

Mitteilung des Instituts
für Grundbau und Bodenmechanik
Technische Universität Braunschweig

Heft Nr. 27

**Einfluß der Alterung auf die Tragfähigkeit
von historischen Spickpfahl-Gründungen**

von
Hans-Wilhelm Wichert

Braunschweig 1988

Vorwort des Herausgebers

Bei der Sanierung und Erhaltung historischer Bauwerke stellt sich häufig die Frage der Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit der Gründung. Dies gilt insbesondere dann, wenn die Gründungselemente aus dem Baustoff Holz bestehen. Bei Spickpfahlgründungen, zur Baugrundverbesserung dicht an dicht eingerammte Holzpfähle geringer Tiefe, stellt sich zusätzlich die Frage der Stützung und Tragfähigkeit des zwischen dem alternden Holz verdichteten Bodens.

Zur Untersuchung dieser Fragen wurden aus zahlreichen Fundstellen historischer Hölzer, nicht nur Pfahlgründungen, Proben entnommen. Diese wurden uns dankenswerter Weise von Bauämtern, Denkmalschutzämtern und archäologischen Instituten zur Verfügung gestellt. An diesen Proben wurden in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung holztechnische und holzanatomische Untersuchungen durchgeführt. Darüber hinaus wurden die mechanischen Eigenschaften des Holzes untersucht. Um die Vorgänge bei Alterung des Holzes unter natürlichen Bedingungen zu simulieren, wurden Alterungsversuche an frischem Holz ausgeführt. Das künstlich gealterte Holz wurde analog zu den historischen Fundstücken untersucht.

In einem weiteren Untersuchungsschritt wurde das Spannungs-Verformungsverhalten der Verbundkonstruktion "Spickpfahlgründung" unter Berücksichtigung der Alterung des Holzes untersucht. Dazu wurden in einer Triaxialzelle Scherversuche an Hölzern verschiedener Festigkeit und Alterung durchgeführt, die in dicht gelagertem Sand eingebettet waren. Aus der Bewertung der Versuchsergebnisse konnten Grenzen für die Standfestigkeit von Spickpfahlgründungen hergeleitet werden. Einfache holztechnische oder bodenmechanische Versuche reichen zur Bestimmung des Zustands einer Spickpfahlgründung aus.

Die hier vorgelegten Untersuchungen wurden aus Mitteln des Niedersächsischen Ministers für Wissenschaft und Kunst gefördert, wofür an dieser Stelle gedankt sei. Gedankt sei auch dem Fraunhofer-Institut für Holzforschung für die gute Zusammenarbeit bei diesem Forschungsprojekt.

(Prof. Dr.-Ing. W. Rodatz)

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig in der Zeit von 1979 - 1985.

Die Anregung zu dieser Arbeit ergab sich aus der gutachtlichen Praxis von Prof. Dr.-Ing. Simons im Rahmen der Sicherung historischer Kirchen in Münster. Das Tragverhalten und der Einfluß der Alterung des Holzes auf historische Spick-Pfahl-Gründungen war weitgehend unbekannt.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Simons - der leider kurz vor der Beendigung dieser Arbeit plötzlich und unerwartet verstarb - gilt mein besonders herzlicher Dank für die Anregung und großzügige Förderung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostäsy und Herrn Prof. Dr.-Ing. H. Nendza danke ich besonders für die Übernahme der Betreuung nach dem Tod von Herrn Prof. Simons. Trotz der Dauer der Fertigstellung waren sie noch immer bereit, die Berichterstattung zu übernehmen.

Ebenso danke ich Herrn Prof. Dipl.-Ing. H. Schulze für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e.h. K. Kordina für die Übernahme des Amtes eines Prüfers.

Viele Mitarbeiter und Kollegen des Institutes, aber auch Studenten als wissenschaftliche Hilfskräfte, waren mir bei der Durchführung der experimentellen Untersuchungen und bei den Schreib- und Zeichenarbeiten behilflich.

Ihnen allen danke ich für die stets freundschaftliche Mitarbeit und immer bereitwillige, umfassende Unterstützung.

Braunschweig/Kerpen, März 1988

Hans-Wilhelm Wichert

Inhaltsverzeichnis

Seite

1.	<u>Einleitung</u>	1
2.	<u>Zur Bauweise historischer Pfahl-Gründungen</u>	2
3.	<u>Ziel der Arbeit</u>	15
4.	<u>Anatomie des Holzes</u>	16
4.1	Allgemeines.....	16
4.2	Makro- und mikroskopischer Aufbau.....	16
4.3	Kapillarität, Wasserhaushalt im Holz.....	25
5.	<u>Holzerstörung im Boden</u>	27
5.1	Allgemeines zum Auf- und Abbau von Pflanzen.....	27
5.2	Holzerstörung durch Pilze.....	28
5.3	Abbau der Holzsubstanz durch Bakterien.....	31
5.4	Chemische Holzerstörung.....	33
6.	<u>Versuche zur künstlichen Alterung durch Säure- Auslaugung</u>	36
7.	<u>Untersuchungen zur Festigkeit und zum Verformungs- verhalten historischer Hölzer</u>	38
7.1	Allgemeines.....	38
7.2	Probenmaterial.....	38
7.3	Technologische Eigenschaften des rezenten Werkstoffes Holz.....	40
7.4	Erläuterungen der Untersuchungen zu Veränderungen des Holzes im Untergrund.....	45
7.5	Ergebnisse der Untersuchungen	
7.5.1	Druckfestigkeit.....	50
7.5.2	Elastizitätsmoduli.....	59

8.	<u>Tragverhalten von Spick-Pfahl-Gründungen</u>	64
8.1	Allgemeines.....	64
8.2	Normalkraft-Pfähle.....	66
8.3	Spick-Pfähle.....	67
8.3.1	Triaxialversuche mit veränderlichem Innendruck.....	70
8.3.1.1	Theoretische Lösungsansätze.....	70
8.3.1.2	Ziel der Versuche.....	74
8.3.1.3	Versuchssand.....	78
8.3.1.4	Probeneinbau.....	83
8.3.1.5	Versuchsdurchführung.....	85
8.3.1.6	Zusammenstellung der Versuchsergebnisse.....	87
8.3.1.7	Bewertung der Versuchsergebnisse.....	90
9.	<u>Zerstörungsfreie und zerstörungsarme Untersuchungen zur Holzfestigkeit</u>	92
9.1	Allgemeines.....	92
9.2	Beschreibung der Methoden der Holzuntersuchungen.....	93
9.2.1	Holzprüfung mit dem Taschenpenetrometer.....	94
9.2.1.1	Handhabung für Holzuntersuchungen.....	95
9.2.1.2	Ergebnisse der Versuche.....	95
9.3	Holzprüfgerät "Pilodyn".....	104
9.4	Sonstige zerstörungsfreie bzw. -arme Methoden.....	106
10.	<u>Einfluß der Bodenfeuchte auf entfestigte Hölzer</u>	107
10.1	Allgemeines.....	107
10.2	Feuchtebewegung in porösen Stoffen.....	108
10.3	Feuchtegehalt im Fundamentbereich bei gewachsenen, natürlichen Böden.....	113
11.	<u>Zusammenfassung und Ausblick</u>	116
	<u>Literaturverzeichnis</u>	120

Verwendete Bezeichnungen, Abkürzungen und Indizes

β_D	Druckfestigkeit von Holz (rezent)
β_B	Biegefestigkeit von Holz (rezent)
α	Winkel des Lastangriffs
E_B	Elastizitätsmodul aus Biegeversuch
E_D	Elastizitätsmodul parallel zur Faser
$E_{D\perp}$	Elastizitätsmodul quer zur Faser
m_N	Masse für Normalklima
m_u	Masse bei Wassergehalt u
m_o	Masse (darrtrocken)
u	Wassergehalt, Holzfeuchte
w	Wassergehalt, Boden
r_o	Darrdichte bezogen auf Ausgangsvolumen
ρ_N	Dichte bei Normalklima
ρ_u	Dichte bei Wassergehalt u
ρ_o	Dichte (darrtrocken)
ρ_r	Darrdichte bezogen auf Feuchtvolumen
ρ_R	$1000 \cdot \rho_r$, Raumdichte
$\sigma_{D\parallel}$	Druckfestigkeit parallel zur Faser
$\sigma_{D\perp}$	Druckfestigkeit quer zur Faser
$\sigma_{D\parallel}$	Stauchung parallel zur Faser
$\sigma_{D\perp}$	Stauchung quer zur Faser
Δh	Horizontalverschiebung
ΔV	Volumenveränderung
R	Korrelations-Koeffizient
τ_f	Scherfestigkeit
φ'	innerer Reibungswinkel

σ	Normalspannung
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Maximale Hauptspannungen
σ_s	Tagentialspannung
σ_r	Radialspannung
σ_{ro}	Innendruck der Wassersäule
σ_{roB}	Bruchspannung
s	Setzung
σ_s	Sohlspannung
n	Porenanteil
e	Porenzahl
$\rho_{d \min}$	lockerste Lagerung für nichtbindigen Boden
$\rho_{d \max}$	dichteste Lagerung für nichtbindigen Boden
P_{eff}	äußere Belastung auf Versuchskörper
F	Kraft
Δs	Setzungsdifferenz
η	Bruchspannungsverhältnis
c_u	undrānierte Anfangsfestigkeit (Penetrometerskala)
FK	Feldkapazität
ψ_m	Matrixpotential
p^F	Wasserspannung
PWP	permanenter Welkepunkt (Sonnenblume)
WS	Wassersäule
p/p_0	relativer Dampfdruck
ψ_H	hydraulisches Potential

1. Einleitung

Die Sanierung historisch wertvoller Stadtteile und Gebäude ist inzwischen eine von der Gesellschaft anerkannte Aufgabe und gewinnt an Bedeutung. Man ist heute zunehmend bereit, Gebäudesubstanz durch Sanierung zu erhalten und nicht - wie in den letzten 40 Jahren vielfach geschehen - alte Stadtteile und Gebäude einfach abzureißen und durch Neubauten zu ersetzen.

Eine wesentliche Aufgabe bei der Sanierung alter Gebäude kommt dem Grundbau und der Bodenmechanik zu. Sehr häufig lagen die sanierungsbedürftigen Stadtteile in Gebieten mit gering tragfähigem Baugrund und hohem Grundwasserspiegel. Hierdurch war es nötig, die Fundamente auf Pfahlelemente abzusetzen, die aus Holz bestanden. Diese Gründungsart der uns erhaltenen Bauwerke hat insgesamt seine hohe Tragfähigkeit über viele Jahrhunderte bewiesen.

Die Gründungsprobleme historischer Gebäude sind sehr vielfältig.

Der Teilaspekt der Holz-Pfahl-Gründungen soll in der vorliegenden Arbeit näher untersucht werden. Die Gründungssysteme aber auch die Tragfähigkeit des Holzes in Abhängigkeit vom Grad der Holzzerstörung sind von wesentlicher Bedeutung.

Weiter wird versucht, Methoden zur Bestimmung der Holzfestigkeit zu entwickeln, die es erlauben, historisches "Holz" richtig einzuschätzen.

Die Bedeutung des Forschungsthemas wird unterstrichen durch die Tatsache, daß an der Universität Karlsruhe der Sonderforschungsbereich 315 mit dem Thema "Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke; Bauefuge, Konstruktionen, Werkstoffe" im Juli 1985 seine Arbeit aufgenommen hat.

2. Zur Bauweise historischer Pfahl-Gründungen

Beschreibungen von und Hinweise auf die Gründungen früherer Epochen sind - verglichen mit der detaillierten Beschreibung der Gebäude - nur vereinzelt zu finden, obwohl alles, was gebaut, auch gegründet werden mußte. Man baute nach den überlieferten Erfahrungen und es scheint, daß dem Problem der Einleitung von Lasten in den Baugrund kaum oder gar keine Aufmerksamkeit geschenkt wurde.

Während die Entwicklung der Gründungen mit den Urformen des Wohnens vor ca. 10.000 Jahren begann, sind erste echte Pfahl-Gründungen mit der Konstruktion von Stegen für ufernahe Wege identisch. Beim Steg wurden die Holzpfähle in den Untergrund getrieben; durch Verbinden der Pfähle und Auflegen eines Bohlenbelages entstand ein dauerhafter Weg.

Erste lastverteilende Konstruktionen "Bohlwege" aus nebeneinanderliegenden Baumstämmen waren meist keine dauerhafte Lösung, da diese mit der Zeit allmählich im Morast versanken.

Eine in Niedersachsen aus der Zeit von ca. 2.500 v. Chr. noch recht gut erhaltene Wegbefestigung sind die Bohlwege, wie sie von Hajo Hayen vom Museum für Naturkunde und Frühgeschichte in Oldenburg seit über 30 Jahren in den ostfriesischen Mooren freigelegt werden (Bild 1).

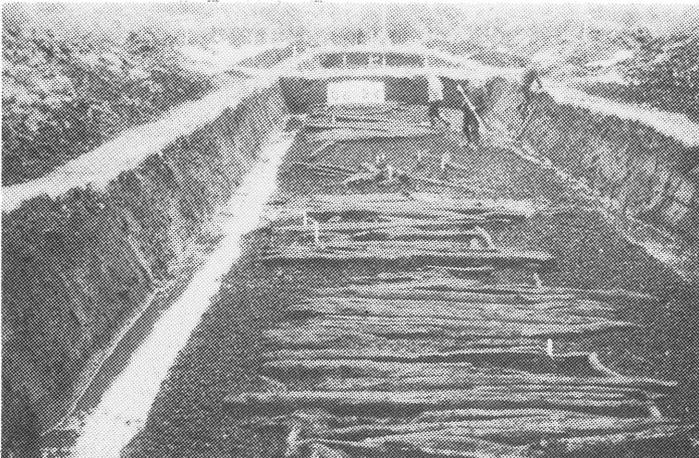
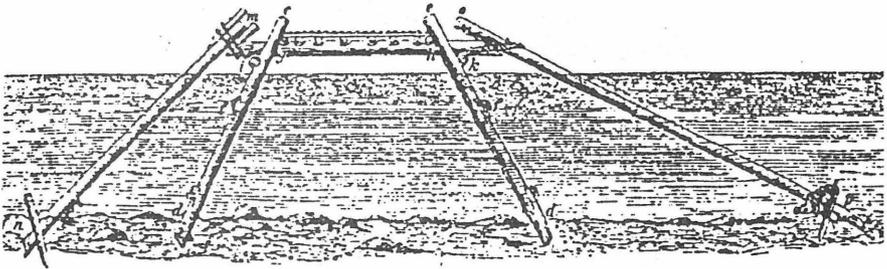


Bild 1: Bohlwege bei Aurich

Diese Bohlwege machten die Moorwege befahrbar, wurden jedoch unaufhaltsam vom Moor überwachsen und damit konserviert. Sie stellen ein einzigartiges Zeugnis frühen Straßenbaus und die ältesten Funde menschlicher Kultur Europas dar. Die überlassenen Proben ermöglichen die Untersuchungen von über 4.500 Jahre alten Holzproben im Rahmen dieser Arbeit.

Die römischen Bautechniken sind uns von dem Gelehrten Vitruvius (kurz = Vitruv) in einfacher und geschlossener Form überliefert /103/. Sein Werk in der Übersetzung von K. Fensterbusch (1981) "Die zehn Bücher über Architektur" umfaßt das gesamte Bauwesen. Das Buch behandelt auch Gründungen und deren Baustoffe und ist die Beschreibung antiken Bauens schlechthin.

Beispiele römischer Gründungen sind auch aus Deutschland bekannt. Eine Konstruktion, die die Technik der Pfahl-Gründungen zeigt, ist die Kriegsbrücke Cäsars, die 55 v. Chr. bei Neuwied mit einer Länge von 400 m entstand (Bild 2).



Cäsars Rheinbrücke.

Bild 2: Cäsars Rheinbrücke aus Pupp /78/

Die Tiefgründungen der Pfeiler wurden häufig nicht nur wegen des Untergrundes, sondern auch wegen der Gefahr der Unterspülung der Pfeiler gewählt (Bild 3).

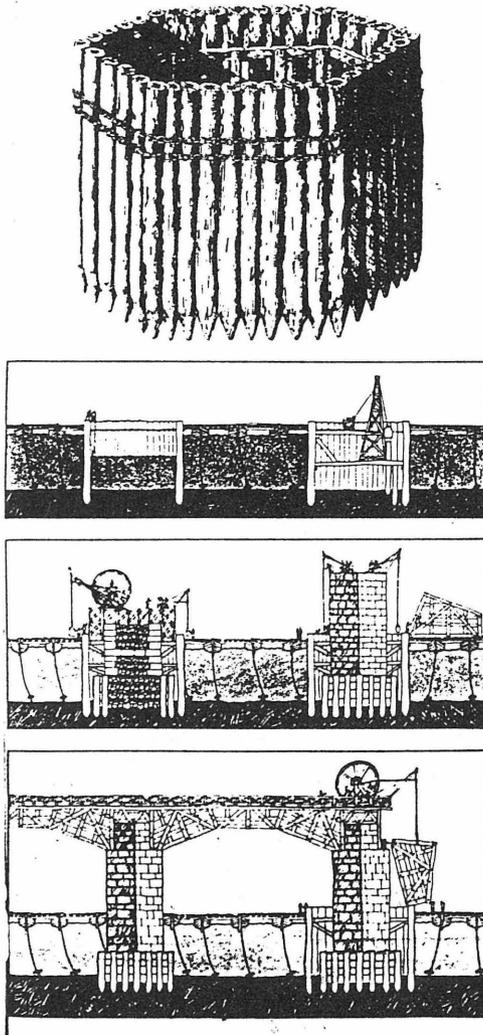


Bild 3: Bau einer römischen Brücke nach Macaulay /68/

Nach dem Verfall des römischen Reiches war die abendländische Kultur geprägt vom Kampf um die Herrschaft in Europa. Die geniale Bautechnik der Römer schien in Vergessenheit zu geraten, sie wurde weder durch Neues ersetzt noch weiterentwickelt.

Nach der Romanik ab ca. 1000 n. Chr. begann der wirtschaftliche und soziale Aufstieg und damit ein Neubeginn in bautechnischer und bauhandwerklicher Sicht.

Im Kirchen- und Bogenbau konnten sich die Baumeister profilieren, doch häufig wurden sie Opfer der mangelhaft ausgeführten Bautechnik, nicht zuletzt der Gründungen. Man lernte und entwickelte sich durch sein auf der Baustelle erworbenes Können und den von Ort zu Ort verschiedenen Bauformen je nach den überkommenen und weiterentwickelten Techniken. Die Fundamente blieben mitunter ein Schwachpunkt des mittelalterlichen Baugeschehens.

Häufig wurden Mängel im Untergrund nicht entdeckt oder die Auswirkungen der Lasten auf den Baugrund nicht beachtet. Bekannte Beispiele für Gebäude aus dieser Zeit mit Schäden aus mangelhafter Gründung sind u. a.

Dom zu Lübeck (siehe Pieper /76/)

Dom zu Speyer (siehe Rūth /72/)

Dom zu Mainz (siehe Rūth /83/)

Auffallend sind die meist sehr flachen Streifenfundamente mit einer für die Lasten zu geringen Ausladung, zudem bestanden die Fundamente meist aus lose verlegtem Quadermauerwerk oder aus Findlingen.

Eine Vielzahl, wenn nicht die meisten, der historischen und noch erhaltenen Gebäude stammen aus der Zeit der Gotik. Eine sorgfältige Verfeinerung der Bautechnik in Verbindung mit statischen Überlegungen und dem Beherrschen des Materials steigerten die Bauformen, die bis heute unübertroffen sind. Erstmals war im Gegensatz zur Romanik für die komplizierte Technik der Gotik ein Baumeister nötig, der das Können und die Erfahrung mitbrachte.

Die Standorte historischer Gebäude wurden in der Regel nicht nach gründungstechnischen Kriterien ausgewählt. Oft waren die Untergrundverhältnisse schlecht. Nicht selten wurde auf den geschleiften Fundamenten alter Kirchen gegründet. Ein Beispiel ist der Mainzer Dom (siehe Rūth /83/).

Pieper (1980) bemerkte in einer Stellungnahme zu dieser Forschungsarbeit:

"Nur an einer allerdings maßgebenden Stelle ihrer Bauten haben fast alle Baumeister der Romanik und Gotik weitgehend versagt, in den Fundamenten. 80 % der heute die historischen Bauten bedrohenden Schäden haben ihre Ursache in den zu schwachen Fundamenten. Selbst auf gutem Baugrund sind Beanspruchungen des Bodens so hoch, daß die Fundamente unter dem Horizontalschub der Gewölbe verdrehen und die Pfeiler, die in sich oft gerade blieben, sich nach außen neigen."

Da aber die Städte meist unter Berücksichtigung von Knoten der Handelswege in Flußniederungen angelegt wurden, mußten die Großbauten oft auf schlechtem Baugrund errichtet werden.

Die häufig mangelhaften Gründungen können nicht immer den Baumeistern angelastet werden. Die Bauzeit einer Kirche von bis zu 200 Jahre ergab möglicherweise Belastungsänderungen, die kaum noch aufnehmbar waren. Die Folgen dieser Laständerungen überlagerten sich häufig mit der Konsolidierung des anstehenden bindigen Bodens in den Niederungen der Städte.

Stand in der Gründungssohle tragfähiger Baugrund an, so gab es bei punktförmigen Lasten in Verbindung mit feinsandigen Boden und/oder Grundwasser bereits erhebliche Probleme; die Füße der Arbeiter und damit auch die einzelnen Steinquader der Fundamente versanken im Boden oder verkanteten sich beim Betreten einzelner (örtlicher Grundbruch). Als Hilfsmittel verwendete man zur Stabilisierung der Gründungssohle dicht an dicht gerammte Holzpfähle, die sogenannten Spickpfähle (siehe Kap. 8). Erste Hinweise aus damaliger Zeit zu der Ausführung von Holz-Pfahl-Gründungen sind in der Literatur zu finden (/70/, /78/, /90/, /97/, /103/).

Die Renaissance und das Barock brachte die Wiedergeburt der spät-römischen Architektur und Baukunst mit ihrem Ursprung in Italien. Es entstanden mittelalterliche Bauformen mit nur äußerlich erkennbarer variabler Ornamentik, wie z. B. das Gewandhaus Braunschweig (1591). Die Bauten dieser Zeit entstanden fast ausschließlich als Bürgerhäuser, Rathäuser, Palais und Schlösser, die heute überwiegend die sanierungsbedürftige Bausubstanz aus dieser Epoche ausmachen. Wesentliche Aufzeichnungen auch bezüglich der grundbaulichen Entwicklung stammen von italienischen Architekturtheoretikern, wie z. B. Alberti /1/, /97/ und Palladio /70/. Sie griffen die Aufzeichnungen Vitruvs aus der Antike wieder auf. Man begann die Tradition des Handwerks zu verlassen und benutzte Zahlen und Zirkel. Es entwickelte sich ein Bauen nach mathematisch, geometrischen Entwurfs- und Konstruktionsregeln in Verbindung mit dem intuitiven Handeln.

Alberti berichtet in seinem Werk "Zehn Bücher über die Baukunst" aus Straub /97/ über solche Gesetzmäßigkeiten, zu denen auch die Gründungen gehörten. Über Pfahl-Gründungen für Brückenbauten heißt es,

"daß die Flächen des Rostes doppelt so breit wie die Dicke der aufzubringenden Mauern sein sollten, die Länge der Pfähle nicht weniger aus $1/8$ der zukünftigen Mauerhöhe und der Durchmesser der Pfähle nicht weniger als $1/12$ ihrer Länge betragen sollte."

Auch zur Eignung von Holz wird Stellung genommen.

Eine besondere Baumaßnahme der Stadt Venedig war die 1587 - 1591 im wesentlichen auf Holzpfählen gegründete Rialto-Brücke.

Straub /97/ berichtet hierzu wie folgt:

"... die um 1590 an der Rialto-Brücke in Venedig angewandte Gründungstechnik, von der überliefert ist, daß die Widerlagerfundamente der Richtung des Gewölbeschubes entsprechend in geneigten Schichten auf einem treppenförmig abgestuften Pfahlrost gemauert wurden, dessen Pfähle so lange gerammt worden waren, bis sie nach 24 Schlägen weniger als 2 Finger eindringen."

Hier sind erstmals Angaben über das Rammen niedergelegt.

Es zeigte sich, daß alle diese Entwicklungen keine wesentlichen Verbesserungen der Gründungstechniken ergaben. Bohrungen als Hilfsmittel zur Baugrunderkundung waren unbekannt, der Aufbau des Untergrundes damit auch.

Es ist festzuhalten, daß die historischen Gebäude, die die Zeit von ca. 500 Jahren überdauert haben, in ihren Gründungen so schlecht nun wieder auch nicht sein können. Es handelt sich um eine positive Auslese. Wieviele Gebäude vorher versanken oder abgebrochen und/oder an anderer Stelle neu errichtet wurden, ist nicht bekannt.

Die Bautechnik der Neuzeit ab 1750 änderte sich zunächst kaum, erst ab Mitte des 18. Jahrhunderts wurden erste Versuche unternommen, praktische Aufgaben mit den Methoden der exakten Wissenschaft zu lösen.

Nun begann eine rasche Entwicklung des wissenschaftlichen Potentials, wie z. B. die den Bodenmechanikern bekannten und heute noch gültigen Erddruckansätze von Coulomb um 1770 und die parallel sich entwickelnde industrielle Revolution, mit der für Gründungsaufgaben wichtigen Dampfmaschine. Hier auch trennten sich die Wege der Baukunst. Es entstand die künstlerische Architektur und der praktische wissenschaftliche Ingenieurbereich.

Das Pfahlmaterial der Gründungen ist weiterhin hauptsächlich Holz, das bei der Gründung mit seiner Oberkante mindestens 30 cm unter dem niedrigsten bekannten Grundwasserspiegel liegen mußte, weil sonst das Holz faulen würde. Es wurde harzreiches Kiefernholz, Buche und Erle empfohlen. Das inzwischen knappere Eichenholz blieb "Längspfählen, welche mit einem Teile ihrer Länge aus dem Wasser oder Boden hervorragten" (Straub /97/) vorbehalten.

In der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurde die Baugrundlehre auf wissenschaftlicher Grundlage von Terzaghi 1925 in unserem heutigen Sinne begründet. Es begann die stürmische Entwicklung des

Grundbaues mit Hilfe der Wissenschaft und der technischen Möglichkeiten des Spezialtiefbaus, wie Injektionen, Bohr- und Ramppfähle, Schlitzwände, Bodenverdichtung.

Es ist jedoch festzustellen, daß die theoretischen Möglichkeiten wegen des schwer erfaßbaren Materials Baugrund nur in Verbindung mit praktischen Versuchen Aussicht auf langfristigen Erfolg haben.

Holz als Baustoff für Gründungselemente ist heute noch nicht gänzlich von Beton und/oder Stahl verdrängt. Nicht selten ist es wirtschaftlich - z. B. für vorübergehende Maßnahmen wie Lehrgerüste bei Brückenbauten - die Lasten über Holzpfähle entsprechend DIN 4026 /N 9/ in den tragfähigen Baugrund abzuleiten. Als nachwachsender Rohstoff wird die Bedeutung von Holz darüber hinaus wieder zunehmen. Es ist sinnvoll, das Holz wieder neu zu entdecken, gerade auch für die Geotechnik.

Aus dem Studium der Literatur über die Baukunst unserer Vorfahren in Verbindung mit den Berichten bisheriger Sanierungen historischer Gebäude stellt man fest, daß es in bezug auf Holz als Gründungselement im wesentlichen drei unterschiedliche Systeme gibt:

1. Die echte Pfahl-Gründung mit einer Lastabtragung bis in größere Tiefen ab 5 m und tiefer.
2. Die Spick-Pfahl-Gründung
Pfähle im Sinne einer Baugrundverbesserung von wenigen Dezimetern bis ca. 3,0 m Länge unterschiedlicher Durchmesser.
3. Der lastverteilende, horizontale Balkenrost mit und ohne senkrechte Pfähle.

zu 1. Echte Holzpfahl-Gründungen (Bild 4) mit einem Alter von über 200 Jahren, bei denen die Gebäude-Lasten ausschließlich über die Pfahlnormalkräfte bis in den tieferen Untergrund übertragen werden, sind heute relativ selten. Diese Pfähle bestehen dann meist aus Eiche, deren Material besonders widerstandsfähig ist.

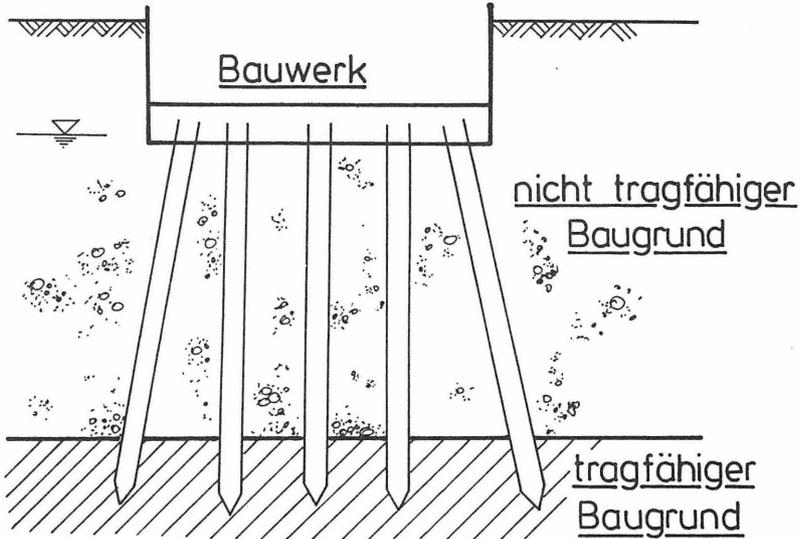


Bild 4: Echte Holzpfehl-Gründungen

Diese Tiefgründungen waren dann erforderlich, wenn in der Gründungssohle nicht tragfähiger Untergrund anstand (weiche oder lockere Bodenschichten), der bei Belastung mit erheblichen Setzungen reagiert.

zu 2. Spick-Pfahl-Gründungen (Bild 5, 6) mit Holzpfählen im Sinne einer Baugrundverbesserung sind die älteste Form der Pfahl-Gründungen. Zur Stabilisierung des Bodens ramnte man sogenannte Spick-Pfähle in den Untergrund, der Boden wurde gespickt. Nicht selten entstand eine gespickte Fläche mit Pfählen "Mann an Mann" unterschiedlicher Länge (bis zu fast 3 m) und Dicke (ϕ 5 - 30 cm).

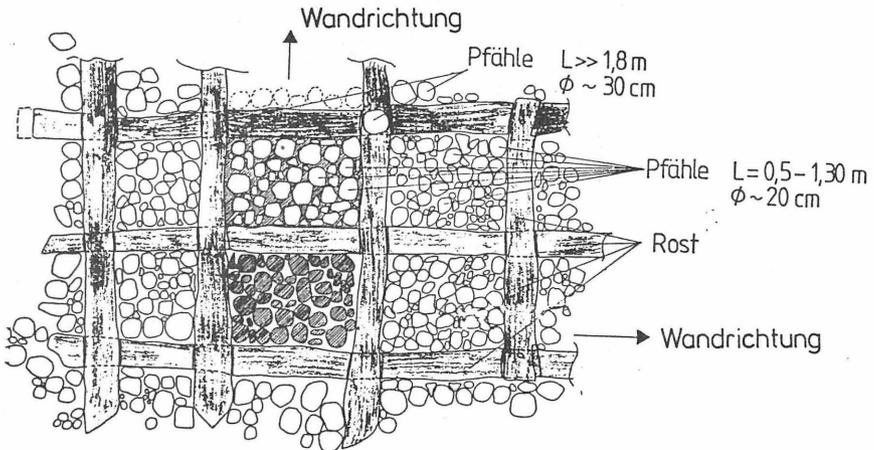


Bild 5: Spick-Pfahl-Gründung Schloß Gifhorn (1250) - Draufsicht

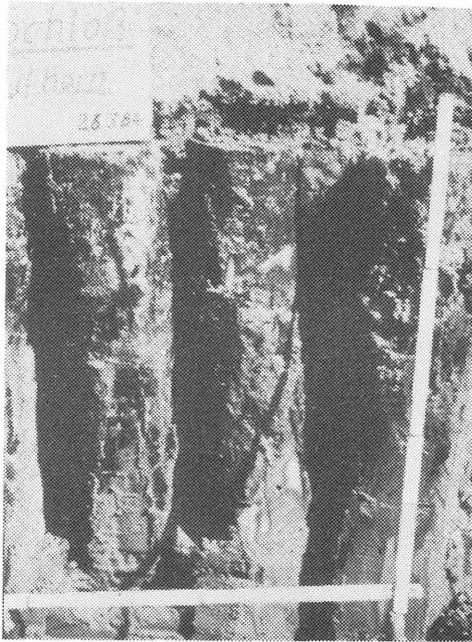


Bild 6: Spick-Pfahl-Gründung Schloß Gifhorn (1250)

Wegen der geringen Abstände der Pfähle ergab sich zwangsläufig eine unterschiedliche Länge. Die zuletzt gerammten Pfähle konnten wegen der erzielten Verdichtung nicht mehr auf ein einheitliches Niveau niedergebracht und mußten dünner gewählt werden und erreichten kaum Längen über 1,5 m. Letzte Zwickel wurden mit keilförmigen Holzelementen ausgefüllt. Die Pfahlelemente wurden so lange in den Boden getrieben, bis sie einheitlich "fest" waren.

Es ist bekannt, daß es unter historischen Gebäuden Bauwerksteile mit und ohne Spick-Pfähle gibt bei sonst gleichen Untergrundverhältnissen und einheitlichen Gründungstiefen.

Dies ist ein Hinweis darauf, daß die Spick-Pfähle nur dann eingesetzt wurden, wenn durch den jahreszeitlich schwankenden Grundwasserstand der Baugrund aufgeweicht war (z.B. FlieÙsand im Grundwasser).

Grundbruchabschätzungen für gleichförmige Sande im Grundwasser ergeben, daß in aufgeweichten und lockeren Sanden das Setzen der Quader der ersten Fundamentsteine in das Wasser hinein schwer möglich ist. Wollte man diese ersten Steine auch noch betreten, um weitere zu setzen, so war ein Verkanten nicht selten die Folge. Erst nach der geschlossenen ersten Lage Steine bestand keine "Grundbruchgefahr" mehr.

Es war wichtig, die Fundamente möglichst tief abzusetzen, die Grenze war meist das Grundwasser.

Für Fundamente in fließendem Wasser ist überliefert, daß allein wegen der Gefahr der Fundamentunterspülung eine Spick-Pfahl-Gründung ausgeführt wurde. Die Pfähle bewirkten eine Verlagerung der Gründungssohle bis in die Pfahlspitzen, und damit eine erhebliche Erhöhung der Grundbruchsicherheit.

zu 3. Lastverteilende Balkenroste mit und ohne Pfähle (Bild 7)

Diese Gründungshilfen wurden regional in Verbindung mit Pfählen aber auch mit Steinschüttungen gewählt.

Die Roste hatten die Aufgabe, die Lasten

entweder

gleichmäßig auf den Baugrund zu verteilen, und die freien Felder wurden nicht selten mit Steinen aber auch Holzreisig ausgefüllt

oder

aber die Lasten auf senkrechte Holz-Pfähle bzw. auf in den Boden versenkten mächtigen Steinen zu übertragen.

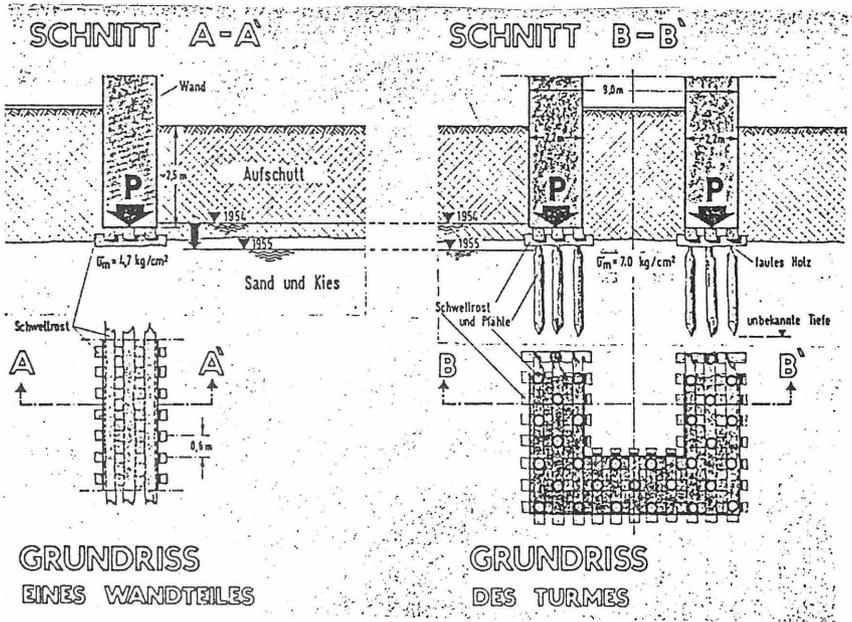


Bild 7: Balkenrostsysteme aus Schultze /90/

3. Ziel der Arbeit

Viele historisch wertvolle Gebäude, wie Kirchen, Bürgerhäuser, Rathäuser und Burgen sind auf wenig tragfähigem Boden gegründet, der durch kurze Holz-Pfähle, sogenannte Spick-Pfähle verbessert wurde.

Diese Mischgründungen aus Holz und Boden haben ihre Tragfähigkeit über Jahrhunderte bewiesen.

Über das Tragverhalten solcher Tragsysteme besteht bis heute weitgehend Unsicherheit.

Die Hölzer sind häufig stark entfestigt und scheinen die Stützung der Fundamente nicht mehr zu gewährleisten. Vergleiche mit einer klassischen Pfahl-Gründung sind wegen der Unterschiede im statischen System unzutreffend.

Ziel der Arbeit ist es, über die grundsätzlichen Vorgänge der Holzzerstörung zu ersten allgemeinen Beurteilungskriterien historischer Pfahl-Gründungen zu gelangen, die es erlauben, die zeitliche Standsicherheit zutreffender abschätzen zu können.

4. Anatomie des Holzes

4.1 Allgemeines

Holz ist ein besonders weitverbreitetes und vielseitig einsetzbares pflanzliches Produkt, das als nachwachsender Rohstoff, Werkstoff und Baustoff eine weltweite wirtschaftliche Bedeutung hat. Dies wird unterstrichen durch die Tatsache, daß Holz eine hohe Reproduzierbarkeit unter optimalen Umweltbedingungen besitzt.

Obwohl die chemische Elementaranalyse der verschiedenen Hölzer nur sehr geringfügig voneinander abweicht, hat jede Baumart ihren charakteristischen chemischen und strukturellen Aufbau.

Die Eigenschaften des Holzes werden durch die gemeinsamen Merkmale der verholzten Zellwand mit der Zellulose und der Ligninstruktur wesentlich bestimmt.

Der Standort mit seinen Wachstumsparametern Klima, Nährstoffgehalt und Lichtangebot kann bei Abweichungen vom optimalen Bereich erhebliche Auswirkungen auf die Gebrauchseigenschaften haben.

Eine Abschätzung des Standorteinflusses kann durch die Jahresringbreiten und den Spätholzanteil vorgenommen werden. Das Baumalter ist gekennzeichnet durch steigenden Verkernungsgrad und den Spätholzanteil, während die Jahresringbreite durch die geringere Wachstumsgeschwindigkeit älterer Bäume auf einen geringeren Endwert absinkt.

4.2 Makro- und mikroskopischer Aufbau

Holz ist das Dauergewebe der Bäume. Es wird von der als Kambium bezeichneten Bildungsschicht erzeugt, die zwischen Rinde und dem eigentlichen Holz liegt.

Für den Aufbau des Holzes typische Merkmale lassen sich bereits mit dem bloßen Auge (makroskopisch) bzw. mit einer feinen Lupe erkennen. Jedes Holz besteht von innen nach außen aus dem Mark, dem Hauptteil des Stammes (Holzteil) mit Kern und Splint (Jahresringe), der Zuwachszone (Kambium) und der Rinde aus Bast und Borke.

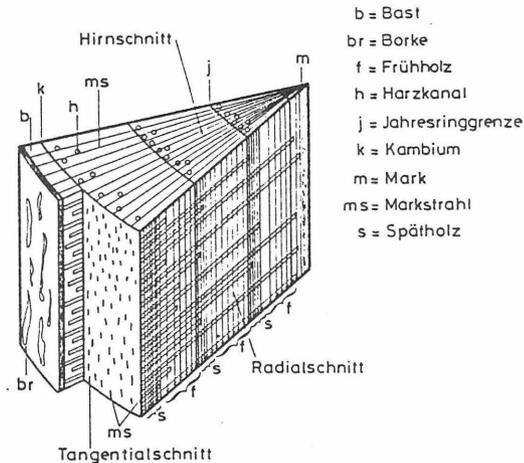


Bild 8: Querschnitt durch einen Holzstamm aus Kollmann /58/

Bei vielen Holzarten ist der Holzteil in einen meist hellen äußeren, das sogenannte Splintholz, und einen meist dunkleren inneren Teil, das Kernholz, unterteilt.

Das Splintholz hat Wasserleit- und Speicherfunktionen, während das innere Kernholz am Stofftransport nicht mehr beteiligt ist.

Grundvorgang der Verkernung ist das Absterben der lebenden Zellen, verbunden mit einer häufigen Einlagerung von Konservierungsstoffen, u. a. durch die Umwandlung der Stärke in Gerbstoffe. Diese Konservierungsstoffe schützen häufig vor pflanzlichen und tierischen Schädlingen.

Man unterscheidet daher u. a. zwischen Kernholzbäumen mit Farbkernbildung (Kiefer, Lärche, Eiche) und Splintholzbäumen (Birke, Erle, Buche) ohne Farb- noch Festigkeitsunterschiede. Kernholz besitzt allgemein eine größere Dichte und Festigkeit und damit größere natürliche Dauerhaftigkeit.

Nach den Funktionen des Baumstammes der mechanischen Festigkeit, der Wasserleitung und der Stoffspeicherung können drei Gewebearten unterschieden werden:

Festigkeitsgewebe auch Holzfaser genannt, bestehend aus Tracheiden bei Nadelhölzern und Libriformfasern bei Laubhölzern

Leitgewebe bei Laubhölzern, bestehend aus weitlumigen Gefäßen (Tracheaen, Poren)

Speichergewebe bestehend aus Parenchym-Zellen

Die Urform der Holzzelle - die Tracheide - dient sowohl der Wasserleitung als auch der Festigkeit. Die Tracheide des Frühholzes ist dünnwandig und weitlumig, die des Spätholzes dickwandig und englumig. Zum Flüssigkeitsaustausch von Zelle zu Zelle besitzen sie bis zu 300 runde "Holztüpfel" als Ventile.

Libriformfasern bilden bei den Laubhölzern - nur hier kommen sie vor - die Hauptmasse und beeinflussen entsprechend ihres Anteils unmittelbar die Dichte, die Festigkeit und Quelleigenschaften. Sie sind nicht immer von den Tracheiden zu trennen, haben aber wegen ihrer dicken Wandungen und den kleinen Tüpfeln eine hohe Festigkeit.

Die Gefäße der Laubhölzer sind ganz auf die Wasserleitung hin entwickelt. Eine Vielzahl solcher Gefäße aneinander bilden ein Rohrleitungssystem von bis über 10 m Länge. Ist eine Verkernung ausgeblieben, so ist die Wegsamkeit für chemische Substanzen sowie Mikroorganismen leichter, ein Holzabbau in axialer Richtung kann schneller erfolgen.

Die Parenchymzellen sind axial und radial orientierte Zellen, in der Regel nicht lignifiziert und bilden das Speichersystem für Nährstoffe und andere Substanzen.

Die Mark- und Holzstrahlen sind Bündel von Parenchymzellen in radialer Richtung zur Leitung und Speicherung organischer Stoffe und anorganischer Salze.

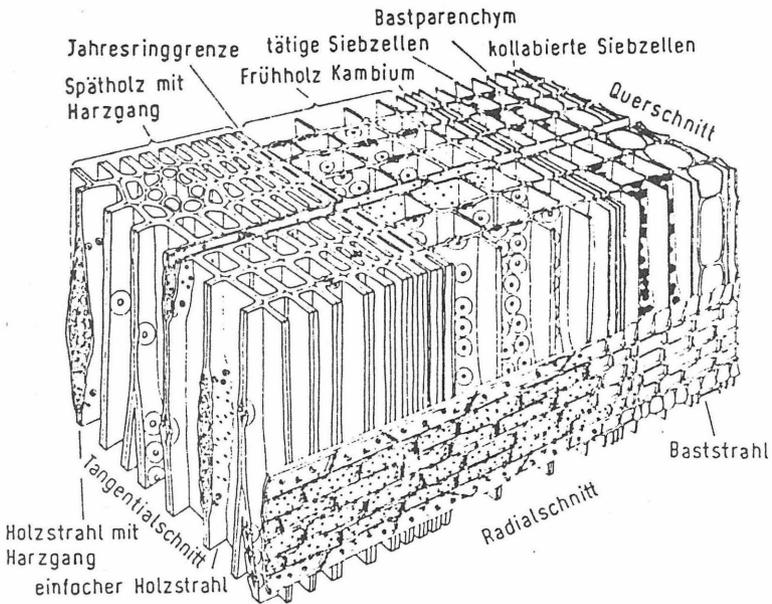


Bild 9: Räumliche Darstellung des mikroskopischen Aufbaus nach Kollmann /58/

Art, Größe, Form und Verteilung der verschiedenen Zell- und Gewebearten lassen sich mikroskopisch u. a. an Dünnschnitten unterscheiden, in der Regel an den drei üblichen Hauptschnitttrichtungen Quer-, Tangential- und Radialschnitt.

Wichtig für das Verständnis des Baustoffes Holz ist die Kenntnis des Feinbaues, der bereits bei lichtmikroskopischer Vergrößerung erkennbar ist. Die einzelnen Wandschichten werden jedoch erst im Elektronenmikroskop sichtbar und unterscheiden sich im Anteil der verschiedenen Komponenten und besonders der Anordnung der Zellulose. Eine schematische Darstellung enthält Bild 10 für eine Nadelholztracheide.

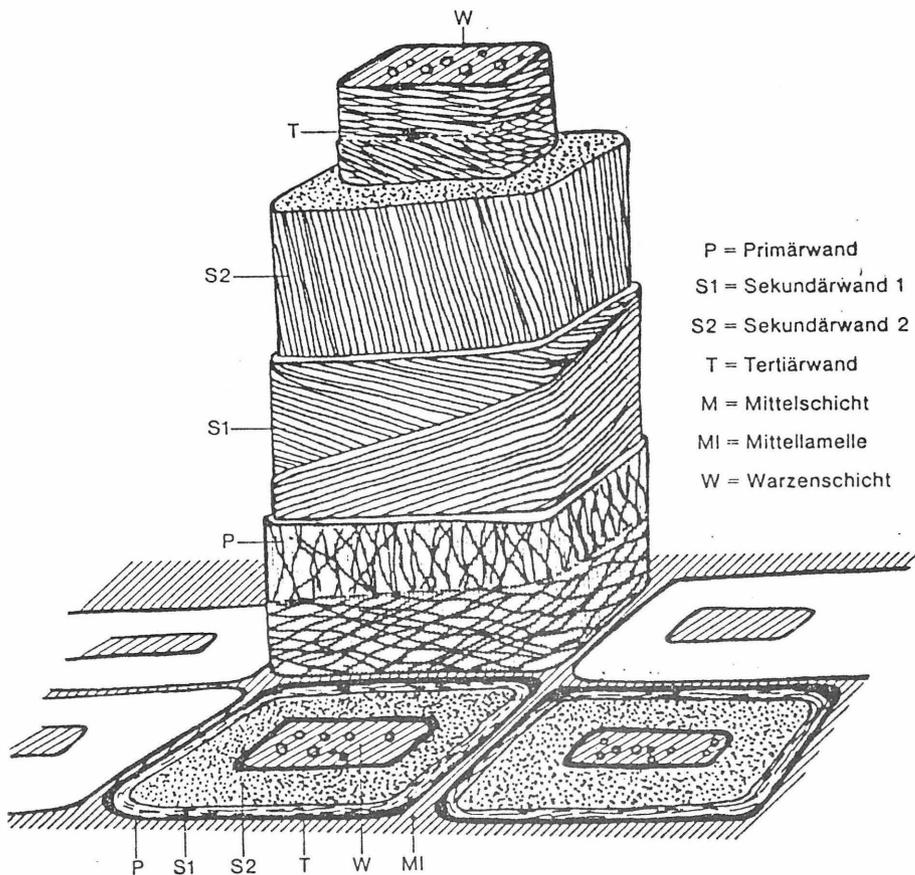


Bild 10: Modell eines Zellwandaufbaus aus Fengel /24/

Zwischen den einzelnen Zellen befindet sich die sehr dünne Mittellamelle von kaum wahrnehmbarer Dicke. Sie besteht aus einer amorphen, gallertartigen Matrix aus Pektin. Sie bildet sich bei der Zellteilung zwischen zwei Zellen, ist stark hydrophil und hat daher eine starke Quellfähigkeit zur Folge.

Die Primärwände bestehen hauptsächlich aus Poliosen und Lignin mit eingelagerten dünnen unregelmäßig kreuzweisen Lagen von Zellulosefibrillen.

Auf die Primärwand wird die Sekundärwand 1 abgelagert mit flachgeschraubten, parallelen Zellulosefibrillen in mehreren Lagen gegenläufiger Schraubung.

Das Verhältnis Matrix zur Gerüstsubstanz beträgt bis zu 94 %. Das ist nur möglich durch die strenge dichteste Packung der Zellulosefibrillen.

Die dickste Wandschicht ist die Sekundärwand 2. Die Zellulosefibrillen verlaufen in sehr spitzen Winkeln zur Faserachse, teilweise nahezu parallel. Die Sekundärwandschichten sind entscheidend für die Stabilität und Festigkeit der Zellwand.

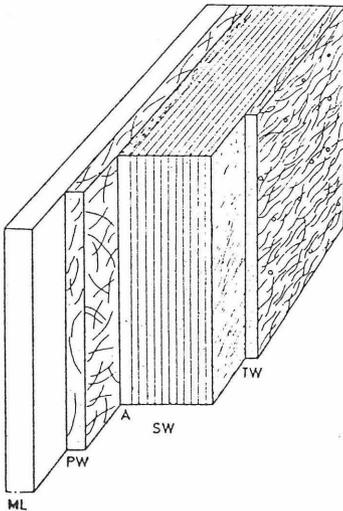
Die lumenseitige dünne Tertiärwand hat wieder einen recht flachen Fibrillenverlauf.

Bereits während des Zellwand-Wachstums aus Matrix und Fibrillen-Gerüstsubstanz beginnt die Durchdringung der rohen Zellwand mit dem Lignin, das innerhalb der verflochtenen Zellwand zu einem dreidimensionalen Raumnetz polymerisiert. Die Durchdringung geschieht recht vollständig, so daß der Ligninanteil dort groß ist, wo die rohe Zellwand vergleichsweise weniger dicht ausgebildet ist.

Nach Frey-Wyssling /31/ ist die Lignifizierung von einem Schwellvorgang begleitet, der durch den sehr widerstandsfähigen Charakter des Lignins irreversibel ist. Die Hypothese würde bedeuten, daß

die Lignifizierung neben einem hohlraumfreien "Betoniervorgang" auch eine dem Schwellen entsprechende "Vorspannung" des Zellulosegerüstes zur Folge hat.

Die Zellwand ist durch Stärke, Konstruktion und Material das tragende Element des Zellgewebes und ähnelt als Faserverbundhohlkörper stark der Stahlbetonbauweise.



ML = Mittellamelle
PW = Primärwand
SW = Sekundärwand
in Elementarlamellen
untergliedert
A = Außenschicht
TW = Tertiärwand
(nach Liese aus Braun 1963)

Bild 11: Schematische Darstellung einer Zellwand
aus Fahn /23/

Die chemischen Hauptbestandteile der Holzzellenwand (Holzsubstanz) sind

- die Zellulose
- das Lignin
- die Polyosen (Hemizellulosen)
- die Nebenstoffgruppen

Diese wiederum bestehen im wesentlichen aus den Elementen

C - Kohlenstoff	50 %
H - Wasserstoff	6 %
O - Sauerstoff	43 %
N - Stickstoff	0,1 - 0,2 %
Mineralische Bestandteile	

Hinsichtlich der chemischen Elementarzusammensetzung stimmen die verschiedenen Holzarten, wie auch das Holz im Stamm und den Zweigen im wesentlichen überein. Diese geringen Unterschiede in der Elementar-Analyse der Hölzer dürfen nicht dazu verleiten, eine weitgehende chemische Gleichheit für die verschiedenen Holzarten anzunehmen. Es kommt eben auf den Holzaufbau an.

Die Zellulose ist der Hauptbestandteil der Zellwandsubstanz mit einem komplizierten makromolekularen Aufbau, der noch nicht gänzlich geklärt ist. Beim Abbau von Zellulose wurde festgestellt, daß in bestimmten Abständen der Elementarfibrillen empfindliche Stellen vorhanden sind, die bevorzugt angegriffen wurden. Dies ist für die Holzzerstörung im Untergrund durch Hydrolyse wichtig. Die Zellulose ist äußerst hygroskopisch und quillt im Wasser, ist aber im Wasser unlöslich. In Säuren tritt unter Hydrolyse Lösung ein, Laugen bewirken starke Quellung und Lösung der niedermolekularen Bestandteile. Die Hydrolyse-Reaktion einer Substanz RX mit Wasser kann wie folgt beschrieben werden:



Der Austausch von X durch OH erfolgt in neutralem Wasser. Die Hydrolyse kann durch Säuren und Basen katalysiert werden.

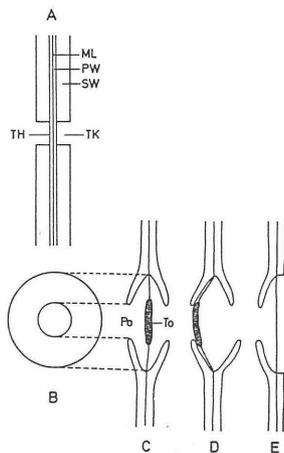
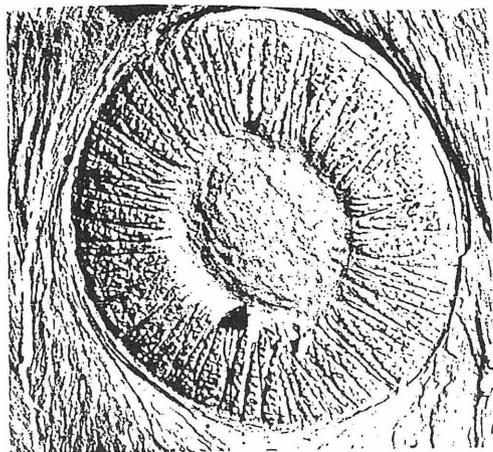
Das Lignin ist ein makromolekularer Alkohol, der die Kittsubstanz der Gerüststoffe bildet. Seine dreidimensionale Vernetzung innerhalb der Zellwand und sein komplizierter Aufbau erschweren die Isolierung und Strukturaufklärung des Lignin sehr. Die Bindungen des Lignins an das Zellulosegerüst sind so stark, daß jedes Trennen der beiden Substanzen zwangsläufig Veränderungen des Lignins zur Folge hat (Bosshard /6/).

Natives Lignin ist im Gegensatz zur weißlichen Zellulose kakao-braun und in Säuren praktisch unlöslich. Das Lignin ist ein aromatischer Stoff, der das Gefüge der Zellen ausfüllt, versteift und hierdurch zu Holz werden läßt. Es ist ein zur Verfestigung und Härtung notwendiger Bestandteil.

Holzpolyosen werden als ein Gemisch verschiedener Einfachzucker bezeichnet. Im Molekularaufbau unterscheiden sich die Polyosen von der Zellulose dadurch, daß sie aus anderen Zuckereinheiten bestehen, verzweigt sein können und die Ketten wesentlich kürzer sind.

Die Nebenstoffgruppen bestehen aus Fetten, Öle, Wachse, Eiweiß, Harz, Gerbstoff sowie mineralische Bestandteile.

Trotz des geringen Anteils können die Nebenstoffgruppen je nach Art und Menge ihrer Einlagerungseigenschaften die Verwendbarkeit des Holzes mehr oder weniger beeinflussen. Selbst Stoffe, die nur als Spurenelemente auftreten, können starke chemische, physikalische und technische Wirkungen ausüben. So verändern diese Einlagerungen Verkernung, Imprägnierbarkeit, Widerstandsfähigkeit gegen Krankheiten oder äußeren Angriffen von Bakterien und Pilzen. Alle Nebenstoffgruppen sind jedoch Stoffwechselprodukte der Bäume.



A: Einfacher Tüpfel; ML = Mittellamelle; PW = Primärwand; SW = Sekundärwand; TH = Tüpfelschließhaut; TK = Tüpfelkanal; Po = Porus; To = Torus. E = Einseitig behörter Tüpfel

Bild 12: Darstellung der Tüpfel aus Braun /15/

4.3 Kapillarität, Wasserhaushalt im Holz

Der Transport von Wasser und der darin gelösten Stoffe geschieht im Kapillarsystem der Luminare. Diese stehen über Öffnungen in der Zellwand - den sogenannten Holztüpfeln - miteinander in Verbindung.

Die Holztüpfel (Bild 12) bilden die sogenannte Tüpfelmembran, die als Ventil zwischen benachbarten Zellen wirkt und sich bei Druckänderung oder Lufteinbruch schließen kann. In der Mittelstellung ist der äußerste Bereich der Schließhaut durchlässig. Bei Druckdifferenz verschließt der dichte Torus die Hoföffnung. Die Funktion bleibt auch im toten Zustand erhalten (geschlagener Baum) und verhindert z. B. die Möglichkeit, mit hohem Druck Tannen- und Fichtenholz zu imprägnieren. Bei der Kernholzbildung (abgestorbene Zellen) sind die Holztüpfel durch Austrocknung verschlossen, in den Torus werden außerdem phenolische Substanzen eingelagert.

Von der Holzfeuchtigkeit hängen fast alle Gebrauchseigenschaften des Holzes ab: Festigkeit, Bearbeitbarkeit, Güte des aus dem Holz erzeugten Zellstoffs und der Widerstand gegen Pilzbefall. Die Holzfeuchtigkeit wird in der Holztechnologie üblicherweise auf das absolute Trockengewicht bezogen. Durch diese Definition sind Wassergehalte von weit über 100 % bei gesundem Holz und bis über 1000 % bei entfestigtem Holz möglich.

Eine wichtige praktische Bedeutung besitzt jener kritische Feuchtigkeitsgehalt, der als Fasersättigung bezeichnet wird. Die Festigkeitseigenschaften sind oberhalb dieses kritischen Feuchtigkeitswertes unabhängig von der Feuchtigkeit, während sie unterhalb eine starke und stetige Abhängigkeit aufweisen. Die Fasersättigung liegt im Mittel bei $u = 28$ Gew.%, mit je nach Holzart geringer Schwankung.

Bei der Betrachtung der Wasserbewegung im Holz muß man vom mikroskopischen und submikroskopischen Bau der Zellwand ausgehen:

- oberhalb des Fasersättigungsbereiches befindet sich das Wasser frei tropfbar in den größeren Zellhohlräumen, den größeren Kapillaren. Es ist im Grunde nicht völlig freies Wasser, sondern es handelt sich vielmehr um Feuchtigkeit, die teilweise durch

sehr beträchtliche Kapillarkräfte an das Holz gebunden ist. Verglichen mit den Bindungskräften des Quellungswassers in den Zellwänden sind diese allerdings sehr klein.

- unterhalb der Fasersättigung befindet sich das Wasser in den Zwischenräumen der Holzsubstanz und als Dampf in den größeren Zellhohlräumen. Die Hygroskopizität des Holzes beruht außer auf der Chemosorption und Oberflächenadsorption auf Kapillarkondensation.

Eine Wasserbewegung entsteht in gefüllten Kapillaren durch Zugunterschiede der Oberflächenkräfte in den Menisken der Kapillaren. Das Wasserleitungssystem besteht aus der Gesamtheit aller Gefäßelemente, die sich zu langen Strängen zusammenfassen lassen sowie den zur Wasserhaltung befähigten Tracheiden. Bei den Laubhölzern konzentriert sich die Wasserleitung auf die relativ schmalen Frühholzzonen der Jahresringe. Dies bedeutet für den Stammquerschnitt, daß der Wassertransport nur noch in den äußeren Jahresringen erfolgt, die Gefäße der inneren Jahresringe sind verschlossen.

5. Holzerstörung im Boden

5.1 Allgemeines zum Auf- und Abbau von Pflanzen

Bei den irdischen Lebensvorgängen spielen nebeneinander drei Kreisläufe die wichtigste Rolle, der
des Wassers,
des Stickstoffs,
des Kohlenstoffs.

Kohlenstoffverbindungen ermöglichen erst das Leben höherer Wesen, da sie Fette, Zucker und Stärke für die Nahrung, Cellulose für die Kleidung und Brennstoffe zur Heizung liefern. Den Aufbau dieser Verbindungen besorgen die grünen Pflanzen, die unter Wirkung des Sonnenlichts ihren C-Bedarf durch Assimilation aus der Kohlensäure der Luft decken. So wird der jährliche Holzzuwachs der Erde auf 1500 bis 2000 Millionen Festmeter geschätzt.

In der Natur ist ein dreifacher Verbrauch der gebildeten Pflanzenmassen vorgesehen:

- die unmittelbare Verwertung durch Mensch und Tier
- die Speicherung für die Zukunft
- die Zersetzung

Letztere dient dem Zweck, die organischen Verbindungen so umzugestalten, daß sie für die spätere Bildung neuer grüner Pflanzen wieder als einfache Bausteine bereitgestellt werden. Helfer sind hier die Bakterien und die Pilze; da ihnen das Blattgrün (Chlorophyll) fehlt, können sie die Kohlensäure der Luft nicht zerlegen und müssen den für ihre Ernährung nötigen Kohlenstoff aus vorhandenen organischen Stoffen ziehen. Dieser Abbau ist für den Haushalt der Natur von höchster Wichtigkeit, er kann aber - ähnlich wie die chemische Korrosion - der menschlichen Wirtschaft empfindliche Verluste zufügen, wenn dieser Abbau sich auf Nutzholz (hier auf Gründungs-Pfähle) erstreckt.

5.2 Holzerstörung durch Pilze

Holz erfährt in der freien Natur eine chemische Umwandlung in beträchtlichem Maße. Daran sind eine Vielzahl von Mikroorganismen des Pflanzenreiches beteiligt, die bestimmte Bestandteile des Holzes abbauen oder aber, wie die Pilze, zunächst die Kohlehydrate und dann das Lignin oder umgekehrt verzehren, so daß nur noch für sie unverdauliche Huminstoffe übrigbleiben.

Die als parasitisch oder saprophytisch lebenden Pilze und auch Bakterien können die zum Aufbau ihrer Zellen und zur Erhaltung ihrer Lebenstätigkeit notwendigen Stoffe nicht wie höhere Pflanzen selbst bilden, sondern sie entnehmen sie z. B. dem Holz der Bäume. Mit Hilfe kompliziert aufgebauter organischer Stickstoffverbindungen, den sogenannten Enzymen oder Fermenten, führen die Pilze unlösliche Bestandteile des Holzes in lösliche über und verwerten diese. Die Fermente oder Enzyme sind stickstoffhaltige Verbindungen, deren bloße Gegenwart die chemische Umsetzung organischer Stoffe bewirkt, werden dabei jedoch nicht selbst zersetzt, sind also den Katalysatoren aus der Chemie vergleichbar. Ihre Tätigkeit beschränkt sich jeweils auf eine bestimmte Stoffart.

Alle holzerstörenden Pilze sind in ihrem Vorkommen an Holz gebunden und verursachen dessen Zerstörung. Die Zersetzung ist als Fäule oder Vermorschung bekannt. Holzerstörende Pilze durchwachsen mit ihren Hyphen das Holz und zerlegen durch ihre Tätigkeit die polymeren Kohlehydrate und/oder auch die Ligninkomponenten.

Die Pilze können entsprechend ihrer Abbauprozesse nach Rypacek /80/ in zwei grundlegende Gruppen untergliedert werden:

1. Braunfäulepilze

Diese können nur den Kohlehydratanteil (Zellulose und Hemizellulose) abbauen. Das Holz wird allmählich braun, verliert auffallend an Gewicht und Volumen, es zerfällt würfelig. Man nennt diese Zerstörung Destruktionsfäule. Die braune Färbung entsteht durch den Abbau der weißlichen Zellulose, als deren Folge tritt das bräunliche Lignin hervor.

2. Weißfäulepilze

Diese Pilze bauen neben der Zellulose und der Hemizellulose auch das Lignin ab. Das Holz wird langfristig aufgehellert und unterscheidet sich dadurch auffällig von nicht befallenen Holz. Teilweise wird es gänzlich weiß, ein ander Mal nur streifig weiß oder es bilden sich Löcher, die nur mit Zellulose ausgefüllt sein können. Das Holz wird weich und bröckelig, bleibt jedoch im Volumen bei einer Gewichtsabnahme konstant, das Holz reißt also nicht auf. Diese Zerstörungsart wird als Korrosionsfäule bezeichnet. Auch sind Bezeichnungen wie Weißfäule, oder bei Lochbildung auch Lochfäule üblich. Der Abbau des Holzes geschieht unterschiedlich. Die Zersetzung des Holzes erfolgt grundsätzlich in mehreren Etappen, die zusammen mit den übrigen Merkmalen als wichtiges Hilfsmittel bei der Bestimmung der Pilzart dienen.

Der Feinbau des Holzes beeinflusst die Ausbreitungsrichtung der Zerstörung. Dabei stellen die Öffnungen der Holztüpfel bevorzugte Schwachstellen in der Holzsubstanz bei der Durchwanderung von außen nach innen dar. Die Zerstörungsarten der Braun- wie der Weißfäulepilze können nebeneinander vorkommen, wenn die Pilzarten in einer Art Symbiose leben, sie können sich aber auch durch unterschiedliche Wirkstoffe gegenseitig behindern.

Die Pilze sind in der Mehrzahl auf Sauerstoff angewiesen, unbedingt erforderlich ist ein größerer Feuchtigkeitsgehalt, dessen Optimum jedoch unter der Sättigungsgrenze liegen muß. Ein Luftporenvolumen von mindestens 20 % scheint erforderlich zu sein.

3. Holzverfärbende Pilze

Diese Pilze rufen auf oder im Holz nur Farbflecken hervor, ohne das Holz zu zerstören.

Neben den wichtigsten Braun- und Weißfäulepilzen gibt es noch weitere von Pilzen verursachte Holzfäulen, wie

Verstockung, Lagerfäule, Trockenfäule, Naßfäule, Wurzelfäule, Stammfäule, Wundfäule und die sogenannte Moderfäule "soft rot fungi",

auf die hier näher eingegangen werden soll, da dieser Pilz besonders unter den Bedingungen der Holz-Pfähle im Untergrund gedeiht.

Bei der Moderfäule handelt es sich um eine Destruktionsfäule des Holzes, bei der die Kohlehydrate zerstört werden. Die Moderfäule ist auch mit geübtem Auge schwer festzustellen. Moderfaules Holz ist an der Oberfläche je nach Holzfeuchtigkeit hell- bis dunkelbraun.

Der Befall ist beim Kern- sowie beim Splintholz zu beobachten und auch gleichermaßen beim Früh- und Spätholz nahezu aller Holzarten. Nach bisheriger Kenntnis sind keine Hölzer bekannt, die gegen Moderfäule widerstandsfähig sind. Der Pilz tritt dort auf, wo das Holz ständig einer großen Feuchtigkeit ausgesetzt ist, die das Wachstum sonstiger Pilze verhindert. Die Erreger der Moderfäule sind Bestandteile der Bodenflora, zersetzen Holzabfälle in Holzlagern und bauen auch die verholzten Pflanzenreste im Boden ab. Die Moderfäule scheint eine allgemein stärker verbreitete Holzzerstörung hervorzurufen als bisher vermutet.

Weiter kann die Moderfäule unter sehr geringem Sauerstoffbedarf ihr Zerstörungswerk beginnen, so daß nicht auszuschließen ist, daß dieser Pilz auch längere Zeit unter Wasser leben kann.

Die Frage, ob das Holz von einem Pilz befallen ist, muß bei den Gründungspfählen sehr frühzeitig beantwortet werden, da hiervon wesentliche Folgemaßnahmen abhängen. Werden nämlich holzzerstörende Pilze festgestellt, so muß mit einem raschen Fortschritt der Zerstörung gerechnet werden, d. h. eine Sanierung durch geeignete Ersatzmaßnahmen wird notwendig.

Ist der Pilzbefall in einem fortgeschrittenen Stadium, so ist die Veränderung auf den ersten Blick zu sehen. Dies gilt nicht so sehr für wassergesättigte Hölzer im Untergrund. Folgende Kriterien für die Veränderungen bei Pilzbefall können nach Rypacek /80/ angewendet werden:

1. Holzfarbe
2. Holzgewicht
2. Anwesenheit von Pilzhyphen

5.3 Abbau der Holzsubstanz durch Bakterien

Als Holzzerstörer haben sich die Bakterien heute als bedeutsamer herausgestellt, als früher angenommen. In der Natur spielt der Bakterienabbau schon immer eine außerordentlich wichtige Rolle, da die Bakterien eine Anhäufung von Zellulose in und auf dem Boden verhindern.

In Frage kommen hauptsächlich zellulosespaltende Bakterien, die sich in der Natur überall dort finden, wo Zellulose zersetzt wird:

- auf faulendem Holz
- im Humus
- im Ackerboden
- im Verdauungstrakt der meisten Lebewesen,
die Zellulose verdauen können

Die Bakterien sind meist in der Lage, sich durch Adaption auch ungünstigen Umweltbedingungen anzupassen. Einteilen lassen sich die Zellulosespalter

- in aerobe - sauerstoffbedürftige
- und anaerobe - sauerstoffmeidende

Bakterien. Letzte herrschen in der Natur vor. Es ist bekannt, daß bei dem natürlichen Zelluloseabbau, der als Gärungsvorgang anzusehen ist, zwei verschiedene Bakterienarten beteiligt sein können, und zwar:

- Methangärungsbakterien, die zur Bildung von Methan neben Kohlensäure und Fettsäuren führen
- Wasserstoffgärungsbakterien, die als charakteristisches Spaltungsprodukt Wasserstoff neben Kohlensäure und Fettsäuren liefern.

Meist - zum Beispiel bei der bekannten Sumpfgasbildung - sind beide Arten nebeneinander vertreten.

Die Wirkungsweise der Zellulosespalter ist auf die Anwesenheit von Fermenten zurückzuführen, die dem Körper der Bakterien entstammen. Beim bakteriellen Abbau der Zellulose wird zunächst durch Enzymtätigkeit eine Hydrolyse der Zellulose erreicht. Hierbei entsteht Zellubiose, die dann in Traubenzucker umgesetzt wird. Erst die folgende Phase verläuft als Gärungsprozeß und führt zur Bildung der schon genannten Endprodukte, von denen die Säuren immer wieder neutralisiert werden müssen, damit die Gärung nicht zum Stillstand kommt.

Die Körperform spielt bei der Bakterienzerstörung eine wichtige Rolle. Während fein verteilte Zweige und Laub erstaunlich rasch verarbeitet werden, bleiben genügend dicke Baumstämme oft Jahrtausende in Sümpfen erhalten.

Die Widerstandskräfte verschiedener Laubholzarten gegenüber Bakterien, die der Beobachtung über die Dauer der Hölzer entsprechen, können allgemein folgender Rangordnung entnommen werden:

Pappel, Buche, Ahorn, Erle, Linde, Esche, Eiche

Die Holzerstörung bei Gründungspfählen durch Bakterien scheint im allgemeinen von untergeordneter Bedeutung bei kurzfristigen Prozessen. Die Vorgänge sind so langsam, daß nennenswerte Veränderungen über Jahrzehnte durch Bakterien allein nicht zu erwarten sind.

5.4 Chemische Holzerstörung

Die chemische Zerstörung von Holz wurde von Fengel /25/ an Proben von ca. 100.000 Jahre alten Fichtenstämmen eingehend untersucht.

Ältere Untersuchungen lassen erkennen, daß bis zu einem Alter von mehreren Millionen Jahren Wandstrukturen bis zu der Dimension der Mikrofibrillen erhalten bleiben und noch alle im rezenten Holz vorhandener Wandkomponenten nachzuweisen sind.

Die verholzten Zellwände unterliegen jedoch im Laufe der Zeit einem Abbau, der im allgemeinen auf der Lumenseite beginnt und zuerst die sekundäre Wandverdickung erfaßt. Von den Zellwandbestandteilen werden die Polysacchariden offensichtlich wesentlich rascher abgebaut als das Lignin.

Die Veränderungen können jedoch nicht mit dem Alter der entsprechenden Holzproben in Zusammenhang gebracht werden, da die Abbauvorgänge stark von äußeren Einflüssen, wie Druck, Temperaturen, umgebendes Medium u. a. abhängen.

Bei der chemischen Analyse ergeben sich für historische Hölzer wesentlich andere Werte als für rezentes Holz. Die Elementaranalyse zeigt bereits deutliche Unterschiede, auch der Anteil der Holzkomponenten verschiebt sich (siehe Bild 13).

Elementaranalyse von rezentem und fossilem Fichtenholz

	C %	H %	O %
Rezente Fichte, Holz	49,6	5,8	44,6
Fossile Fichte, Holz	57,6	5,6	36,8
Rezente Fichte, Lignin	60,8	5,4	33,8
Fossile Fichte, Lignin	59,1	5,5	35,4

Analysenwerte von rezentem und fossilem Fichtenholz

	Rezente Fichte %	Fossile Fichte %
Methanol-Benzol-Extrakt	2,0	1,1
Kaltwasser-Extrakt	1,0	1,2
Heißwasser-Extrakt	2,0	2,3
Holocellulose	81,0	17,6
Alpha-Cellulose	56,5	12,2
Polyosen, gesamt	15,3	4,5
Polyosenfraktion A	11,5	2,5
Polyosenfraktion B	3,8	2,0
Lignin	27,3	74,4
Asche	0,3	2,3

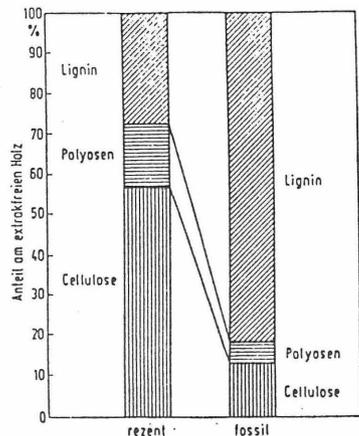


Bild 13: Veränderungen der Holzanteile von rezenten und fossilem Fichtenholz nach Fengel /25/

Häufig ist ein kaum nennenswerter Substanzabbau in den Zellwänden zu erkennen. Der Abbau der Zellwandsubstanz ist sehr unterschiedlich, es liegen stark abgebaute Tracheiden neben kaum zerstörten. Auch können Vertiefungen in die Zellwände hineingefressen sein, die mit Abbauprodukten ausgefüllt sind.

Der ständige Prozeß des Werdens und Vergehens organischer Materie auf der Erdoberfläche spiegelt sich in der Umwandlung pflanzlicher Substanz in Kohle wieder, sind doch mehr als 99 % des organisch gebundenen Kohlenstoffs in Pflanzen festgelegt.

Die Hölzer unter historischen Gebäuden befinden sich erst im Anfangsstadium des Holzabbaus bzw. der Holzzerstörung, auch wenn die Zellwände zum Teil stark abgebaut sind. Dabei ist zu erkennen, daß die Zellwände des Frühholzes gegenüber jenen des Spätholzes stärker ausgelaugt sind.

Dieser Befund steht im ursächlichen Zusammenhang mit dem Eindringen von Flüssigkeit. Damit ist gezeigt, daß Flüssigkeiten (Wasser oder wäßrige Lösungen) beim Abbauprozess der Holzsubstanz eine wesentliche Voraussetzung darstellen. Die im Elektronenmikroskop sichtbare Umwandlung von Zellwandsubstanz in dunkel erscheinende Abbauprodukte wird durch Analysewerte bestätigt. Zerstörtes Holz weist einen sehr hohen Anteil an hydrolyseresistenter Substanz, dem Lignin, auf. Es ist davon auszugehen, daß die zerstörten Holzsubstanzen nicht völlig abgebaut, sondern zum größten Teil in hydrolyseresistente Verbindungen umgewandelt werden.

Nach neueren Untersuchungen, die im Zusammenhang mit den Funden untergegangener Schiffe sowie versunkener Bohlwege durchgeführt wurden, kann man schließen, daß Holz im wassergesättigten Untergrund allein durch chemische Vorgänge zerstört werden kann. Wenn sich Holz im Grundwasser befindet, werden durch ihre katalytische Wirkung vor allem die Zellulosebestandteile im Laufe der Jahrhunderte bei Anwesenheit der Inhaltsstoffe des Grundwassers aufgelöst. Dies führt zur sehr langsamen Entfestigung des Holzes. Dies gilt vor allem für sogenannte Weichhölzer wie Erle und Pappel, die kein Kernholz bilden.

Da im Untergrund bei der chemischen Zerstörung bevorzugt die Zellulose abgebaut wird, liegt es nahe, diesen Vorgang im Labor durch Lagerung in Schwefelsäure bei erhöhter Temperatur nachzuahmen.

Über die Zielsetzung und Ergebnisse der Versuche zur künstlichen Alterung von Erlenholz wird im folgenden Abschnitt berichtet.

6. Versuche zur künstlichen Alterung durch Säure-Auslaugung

Nach Fengel /25/ lag es nahe, für Modelluntersuchungen zum Tragverhalten von Spick-Pfahl-Gründungen künstlich gealterte Pfahlelemente zu verwenden. Bei Gründungen dieser Art wurden in Norddeutschland häufig Erlenholz verwendet.

Eine Säurebehandlung bot sich an, da bereits Fengel /25/ (siehe Bild 13) und die Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Holzforschung /29/ belegen, daß alle Fundstücke einen bis zu dreifach höheren Ligningehalt aufweisen wie rezentes Holz. Die Zellulosebestandteile werden bei Säurebehandlung vorwiegend gelöst. Weil die Holzfestigkeit von der Feuchte und Dichte maßgeblich beeinflußt wird, müssen diese Parameter im Versuch auf eben diese Werte des historisch geschädigten Holzes eingestellt werden. Dabei zeigte sich, daß sich das künstlich abgebaute Holz hinsichtlich Feuchte und Dichte wie stark abgebaute Fundstücke verhält. Die Versuche wurden am Fraunhofer Institut für Holzforschung durchgeführt /30/. Aus den Versuchen und den Messungen an Fundstücken konnte Böttcher /30/ nachweisen, daß eine "streng korrelierte Abhängigkeit zwischen der Dichte des Holzes und der maximal aufzunehmenden Wassermenge" gilt (siehe auch Abschnitt 7.3).

Für die Pfahl-Versuche wurden ca. 25 cm lange runde Erlenholzproben mit einem Durchmesser von 10 cm verwendet. Diese aus einem frischgeschlagenen Erlenstamm gefertigten Proben wurden in 20 %iger Schwefelsäurelösung bei einer Temperatur von ca. 80 - 90°C und unterschiedlicher Lagerungsdauer ausgelaugt. Hierzu mußte eine speziell angefertigte Stahlwanne aus Edelstahl mit Abdeckung und Isolierung hergestellt werden, die diesem chemischen Angriff auch in den Schweißnähten standhielt.

Leider zeigte sich trotz einer mehrmonatigen Lagerung in der erhitzten Säure, daß ein nennenswerter chemischer Angriff der löslichen Zellulose nicht stattgefunden hatte. Die Holzproben mit einem Durchmesser von 10 cm wiesen lediglich im äußersten Randbereich einen nennenswerten Substanzabbau auf, mit rasch abnehmender Tendenz von außen nach innen.

Alle Untersuchungen zur Holzfestigkeit, Dichte und Feuchte an den künstlich ausgelaugten Probestücken brachten nicht den an den kleinen Versuchsklötzchen mit einer Kantenlänge von 2 cm vom Fraunhofer Institut /30/ erreichten Abbaugrad an Holzsubstanz.

Die Versuche mußten abgebrochen werden. Eine Erklärung für den Mißerfolg ist in der geringen Wegsamkeit für die Schwefelsäurelösung zu suchen. Diese geringe Wegsamkeit für Flüssigkeiten wirkt als Auslaugungsschutz, da für die chemische Auslaugung die Herauswaschung gelöster Substanz eine wichtige Voraussetzung ist.

Lediglich bei den zur Kontrolle parallel zu den Großproben gleichzeitig ausgelaugten Kleinholzproben für die Bestimmung der Holzfestigkeit wurden gleiche Abbauraten wie beim Fraunhofer Institut erzielt.

7. Untersuchungen zur Festigkeit und zum Verformungsverhalten historischer Hölzer

7.1 Allgemeines

Will man historische Spick-Pfahl-Gründungen richtig beurteilen, ist die Kenntnis der Festigkeit und des Verformungsverhaltens der in den Untergrund zur Stützung der Gebäude eingebrachten Hölzer von großer Bedeutung.

Da diese Hölzer unterschiedlichen Angriffen ausgesetzt sind (siehe Kap. 5.) und es somit in Verbindung mit der wachstumsbedingten unterschiedlichen Anatomie der verschiedenen Holzsorten zu recht unterschiedlicher Zerstörung kommen kann, wurden umfangreiche Untersuchungen zur Festigkeit und zum Verformungsverhalten historischer Hölzer ausgeführt.

7.2 Probenmaterial

Für die Untersuchungen konnte der Verfasser von einer Vielzahl von Sanierungsbaustellen, Grabungen und sonstigen Fundstellen Probenmaterial gewinnen. Hierzu waren zahlreiche Ortsbesichtigungen zur Probenahme sowie zu allgemeinen Feststellungen der Gründungssituation nötig, verbunden mit den vielen Aufzeichnungen der geometrischen Verhältnisse einschließlich Fotoarbeiten zur Dokumentation.

Die nachfolgende Tabelle (Bild 14) enthält eine Zusammenstellung der Sanierungsprojekte, Grabungen und sonstiger Probenahmen, die dieser Arbeit zugrunde liegen.

Nr. (Probennr.)	B e z e i c h n u n g
1	Nikolai-Kirche Bodenwerder
2	Kirche Drochtersen (nur Planunterlagen, Gutachten)
3	Römerschiffe Mainz
4	Ohnesorg-Theater Hamburg
5	Burg Lethe, Ahlhorn
6	Wohnhaus Buxtehude
7	Kesselschleuse Emden
8	Schloß Ahrensburg
9	Wikinger-Schiffe Haithabu/Schleswig
10	Strebblow-Haus Wolfenbüttel
11	Bohlwege, Uni Köln
12	Schloss Ottersberg
13	Schloß Gifhorn
14	Bohlwege Oldenburg/Aurich
15	Kleinproben verschiedener Standorte
16	Observanten-Kirche Münster

Bild 14: Zusammenstellung der Fundorte von Holzproben

Außer aus Sanierungsaufgaben gelang es, auch Hölzer aus archäologischen Funden zu erhalten. Hierbei handelt es sich um Hölzer von Römerschiffen aus Mainz aus dem Jahr ca. 300 n. Chr. sowie um Holzplanken von Wikingerschiffen aus Schleswig/Haithabu aus dem Jahre 800 - 1000 n. Chr.

Besonders wertvoll waren die Holzproben der Bohlwege aus den Mooren bei Aurich aus den Jahren um 2500 v. Chr. Dieses Holz hatte im Hochmoortorf 4500 Jahre überdauert. Das Holz hat im Untergrund (1,0 - 1,5 m unter Gelände-Oberkante) seine ursprüngliche äußere Gestalt behalten. Es ist jedoch durch die Hydrolyse im Moorwasser weitgehend entfestigt worden. Dies wird durch Holzproben mit Wassergehalten $u \geq 1000$ Gew.% bestätigt. Die äußere Gestalt wird durch die Reststruktur des lignifizierten Holzkörpers gewährleistet.

7.3 Technologische Eigenschaften des rezenten Werkstoffes Holz

Zum besseren Verständnis der Ergebnisse der Holzuntersuchungen historischer Hölzer soll in diesem Abschnitt auf die Eigenschaften des Holzes eingegangen werden.

Gesundes Holz ist ein elastischer Werkstoff, d. h., daß feste Werkstoffe bei niedriger Beanspruchung ihre Form ändern, bei Zurücknahme der Beanspruchung ihre ursprüngliche Gestalt jedoch wieder einnehmen. Diese elastischen Eigenschaften sind ein Kennzeichen für den festen Zustand eines Körpers bis zu einem Grenzpunkt, darüber bleiben plastische Verformungen zurück oder der Körper bricht.

Die physikalischen Eigenschaften wie Dichte und Feuchtigkeitsgehalt haben bei Holz zusätzlich einen bestimmenden Einfluß auf das Verformungsverhalten. Quellen und Schwinden sind Formänderungen der Holzfasern als Folge der Änderung des Feuchtigkeitsgehaltes. Für gesundes Holz gilt dies jedoch nur bis zum Fasersättigungspunkt, d. h. im Bereich $u \leq 30$ Gew.%. Weiter wird das Schwind- und Quellmaß stark von der Rohdichte beeinflusst, mit zunehmender Dichte vergrößert sich die Holzmasse und damit die Feuchteaufnahme. Darüber hinaus sind die Schwind- und Quellmaße von den drei Hauptrichtungen (axial, radial und tangential aus Längsrichtung des Stammes) beträchtlich unterschiedlich (siehe Bild 15).

Diese feuchte- und zeitabhängigen Formänderungen führen zu Verzerrungen des Bauteils. Eine Behinderung erzeugt Zwang und gegebenenfalls Risse. Sie sind jedoch bei gesundem Holz reversibel.

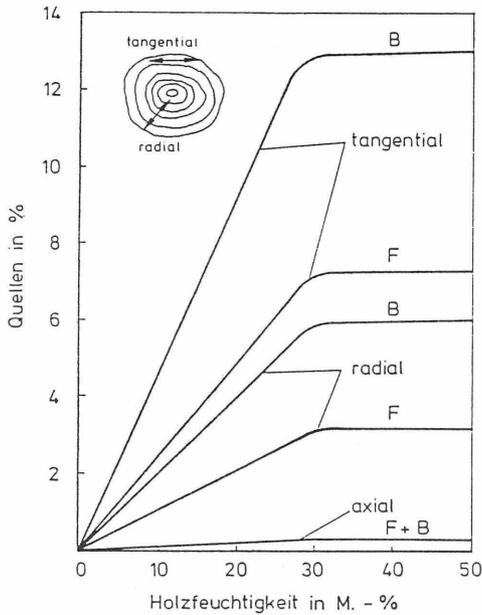


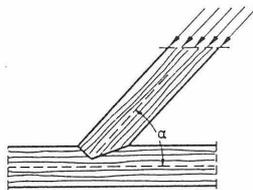
Bild 15: Quellen in Abhängigkeit von der Holzfeuchte am Beispiel Fichte (F) und Buche (B) aus Rostásy /82/

Die mechanischen Eigenschaften des Naturproduktes Holz werden maßgebend von der extrem anisotropen Struktur als Folge des natürlichen Wachstums bestimmt. Im Bild 16 sind zum Vergleich die wichtigsten Eigenschaften für die europäischen Nadel- und Laubhölzer zusammengestellt.

Holzart bzw. Holzwerkstoff	ρ_{12} g/cm ³	E-Modul N/mm ²	Zugfestigkeit β_z N/mm ²	Druckfestigkeit β_D N/mm ²	Biegefestigkeit β_B N/mm ²
europ. Nadelholz ⊥	0,45–0,59	11000–14000 450–550	84–107 2,3–3,0	47–55 5,8–7,7	73–100
europ. Laubholz ⊥	0,69–0,83	13000–16500 1000–1500	90–165 4,0–7,0	52–82 8,0–12,0	110–160
Preßschichtholz ⊥	1,0–1,4	15000–31100 3100–4200	140–360 –	60–216 30–90	130–354
Sperrholz ⊥	0,71–0,95	9200–13300 2600–3600	41–177 –	53–62 –	100–120
Holzspanplatten ⊥	0,50–0,90 (halbschwer)	2000–4500	5–13 0,3–0,7	8–16 1,3–3,4	10–26
Holzfasernstoffe (weich) ⊥	0,20–0,24	200–400	1,0–2,3 –	1,3–2,3 –	1,7–3,5
Holzfasernstoffe (hart) ⊥	0,90–1,10	3300–10000	22,5–49 –	24–55 155–220	43–83

Bild 16: Mechanische Eigenschaften von Holz aus Rostásy /82/

Die wichtigste Tragrichtung für Holz ist die Längsrichtung des Stammes entsprechend der parallelen Ausrichtung der Fasern, die mechanischen Festigkeiten sind entsprechend hoch, senkrecht zur Faser dagegen erheblich reduziert. Die mechanische Anisotropie läßt sich mit der Wabenstruktur der Röhrenbündel erklären. Bei Beanspruchung senkrecht zur Faser bzw. zum Röhrenbündel lassen sich die länglichen Holzzellen soweit zusammendrücken, bis der Porenraum geschlossen ist. Diese Verformung ist mit einem großen Weg verbunden, danach tritt wieder eine Verfestigung ein. Die Querdrukfestigkeit ist daher nicht eindeutig definiert. DIN 52 192 /N 22/ definiert sie als die Spannung bei einer Stauchung von 1 %. Die Abhängigkeit der Festigkeit vom Winkel zwischen Last- und Faserrichtung ist Ausdruck der Anisotropie.



Lastangriff unter einem Winkel α (Versatz)

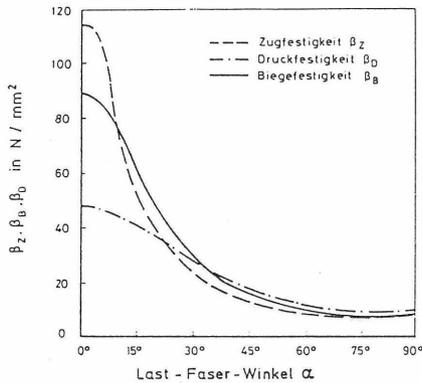


Bild 17: Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften von Faser-Last-Winkel α bei Tannenholz aus Rostásy /82/

In Bild 17 erkennt man die großen Unterschiede zwischen der Zug-, Druck- und der Biegefestigkeit je nach Faserrichtung, wobei die Biegefestigkeit β_B vereinfacht mit linearer Spannungsverteilung ermittelt wird. Der Elastizitätsmodul für Holz kann ebenfalls aus dem Biegeversuch abgeleitet werden. Er stimmt dann mit dem E-Modul aus dem Druckversuch für die Druckfestigkeit nicht überein. Generell kann gesagt werden, daß der E-Modul Holz aus dem Druckversuch etwa bei $2/3$ der E-Module aus dem Biegeversuch liegt. Weiter muß beachtet werden, daß die Festigkeitseigenschaften noch vom Feuchtigkeitsgehalt, der Rohdichte, der Temperatur und von eventuellen Holzfehlern abhängen (siehe Bild 18 und 19).

Allgemein gilt, wie zu erwarten, daß mit zunehmender Rohdichte die Festigkeitswerte steigen und eine zunehmende Feuchtigkeit besonders die Druckfestigkeit beeinflusst.

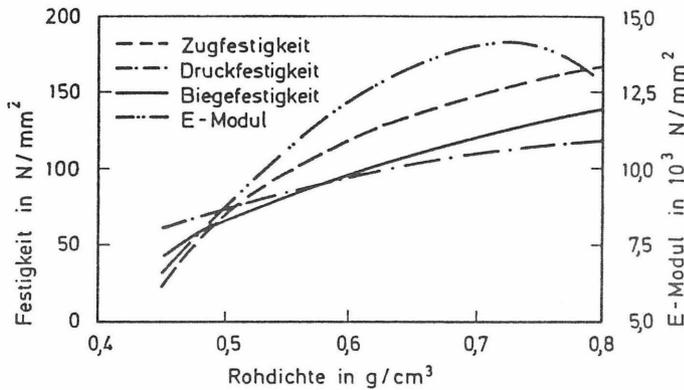


Bild 18: Abhängigkeit der Festigkeitseigenschaften und des E-Moduls von der Rohdichte, z. B. Eschenholz, aus Rostásy /82/

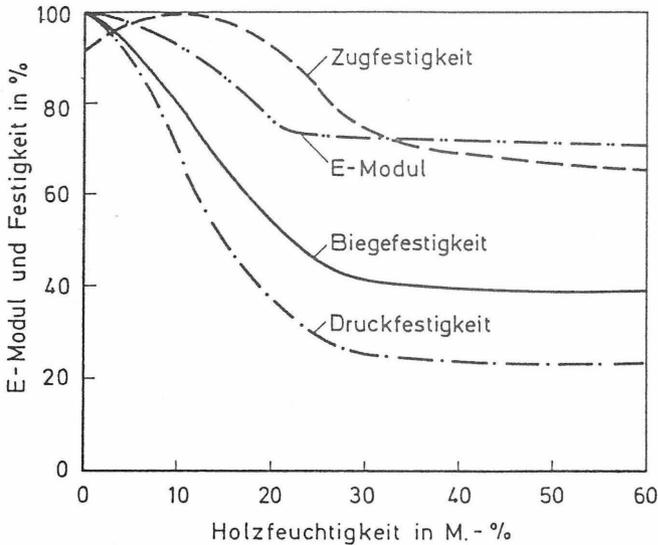


Bild 19: Abhängigkeit des E-Moduls und der Festigkeiten von der Feuchtigkeit am Beispiel Nadelholz aus Rostásy /82/

Das Verformungsverhalten von Holz kann im Anfangsbereich der Beanspruchung als nahezu elastisch betrachtet werden. Höhere Beanspruchungen führen zu bleibenden plastischen Verformungen. Auch geringe Belastungen können vor allem unter Dauerbelastung zu bleibenden Verformungen (Kriechen) führen. Bei der Bemessung von Holzbauteilen wird vereinfachend die Gültigkeit des Hooke'schen Gesetzes angenommen.

Es ist weiter zu beachten, daß die im Labor erzielten Bruchwerte auch noch von der Geometrie der Proben und der Belastungsgeschwindigkeit abhängen.

Werden die zulässigen Gebrauchsspannungen der Bemessungsnormen eingehalten, so bleiben die Kriechverformungen im Verhältnis zu den Quell- und Schwindmaßen unbedeutend. Sie können bei Verformungsberechnungen näherungsweise durch die Abminderung des E-Moduls berücksichtigt werden.

7.4 Erläuterungen der Untersuchungen zu Veränderungen des Holzes im Untergrund

Ziel der Untersuchungen ist die Eingrenzung mechanischer Eigenschaften historischer Hölzer. Generell ist festzuhalten, daß historische Hölzer im Untergrund unterschiedlich stark entfestigt werden, auch unter sonst anscheinend gleichen Bedingungen (Milieu). Auffallend bei allen Funden ist, daß stark zerstörte Hölzer in der Nachbarschaft von weniger entfestigten Hölzern gleicher Baumart anzutreffen sind. Die Gründe für die unterschiedliche Entfestigung sind vielfältig. Sie liegen in den bereits unterschiedlichen Wachstumsbedingungen des Baumes selbst. Das Alter und damit der Durchmesser des Pfahlelementes, der Anteil Splint- und Kernholz, Dichte, Fällzeit und Behandlung bzw. Lagerung vor dem Einbau in den Untergrund spielen ebenso eine wichtige Rolle.

Nach Kap. 2 ist davon auszugehen, daß das Holz der Pfähle im Untergrund generell nur eine Druckbelastung erfährt, und zwar als Normalkraft in Faserrichtung, als Spickpfahl zunächst in Faserichtung und mit zunehmender Entfestigung auch quer zur Faser.

Es wurden daher nur die mechanischen Eigenschaften der historischen Hölzer unter Druckbelastung quer und längs zur Faserrichtung sowie das Schwindverhalten untersucht.

Das historische Holz besitzt in der Regel noch alle Merkmale des natürlichen Holzes. Es ist durch die Inhaltsstoffe im Boden dunkel gefärbt, wodurch die Bestimmung der Holzart durch Augenschein auch für den geübten Fachmann erschwert wird.

Als Bezugsgröße für die Darstellung der mechanischen Eigenschaften wurde der Grad der Entfestigung gewählt, ausgedrückt durch die Dichte bzw. den Wassergehalt, die bei einem wassergesättigten Probenmaterial einen mathematisch eindeutigen Zusammenhang aufweisen. Das Holz ist nach der langen Lagerung im feuchten Untergrund nach den bisherigen Untersuchungen weitgehend wassergesättigt. Daher ist die Unterwasserlagerung bzw. Vakuumverpackung des Probenmaterials unerlässlich.

Die Beziehungen von Wassergehalt und Dichte im wassergesättigten Zustand kann nach Kollmann /58/ wie folgt beschrieben werden:

$$u_{\max} = \frac{100}{r_0} - \frac{100}{r} \quad (\text{Gew.}\%)$$

Hierin bedeuten:

r_0 = Darrdichte bezogen auf Ausgangsvolumen

r = Reindichte der Holzsubstanz

Setzt man für die Reindichte des Holzes im Mittel $r = 1,5 \text{ (t/m}^3\text{)}$, so ist dieser Zusammenhang eindeutig berechnen- und darstellbar.

Böttcher /30/ konnte diese Zusammenhänge für die aus Sanierungsprojekten und archäologischen Funden gewonnenen Hölzer ebenfalls bestätigen.

Historische Hölzer zeigen ein gegenüber gesundem Holz völlig verändertes Verhalten bei der Austrocknung und/oder Wiederbefeuchtung. Je nach Zerstörungsgrad sind vor allem bei Austrocknung an der Atmosphäre die Veränderungen (siehe Bild 20) erheblich. Gerade dieses Schwinden führt bei der Lagerung an der Atmosphäre nach der Herausnahme aus dem Baugrund bei Sanierungsmaßnahmen zu der vor-schnellen Schlußfolgerung, daß das Holzmaterial seine Tragfähigkeit verloren haben muß.

Nicht selten sieht das historische Holz nach einer Entnahme aus dem Baugrund und nach anschließender völliger Austrocknung wie in Bild 20 dargestellt aus. Vom vorher wassergesättigten Holzkörper verbleibt nur eine Restsubstanz mit starker Rißbildung in Längs- und Querrichtung. Die Volumenschwindung kann weit über 50 % betragen; der Vorgang ist nicht reversibel.

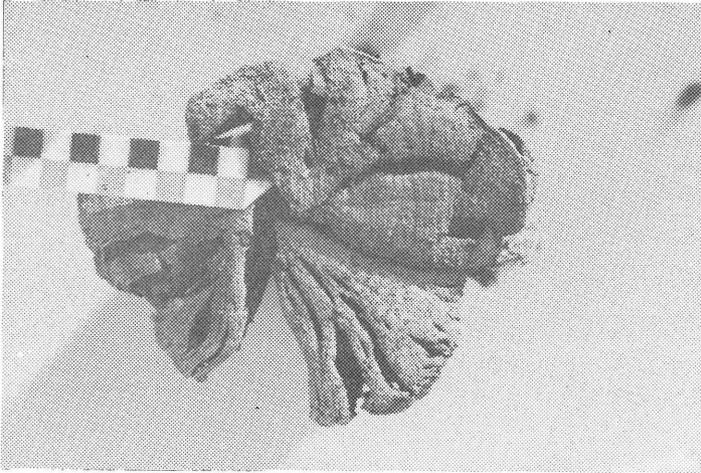


Bild 20: Restsubstanz einer Holzprobe nach der Austrocknung
($u > 400$ Gew.%)

Zerstörtes Holz reagiert sofort auf Wasserverluste bei Austrocknung, im Gegensatz zu gesundem Holz, das praktisch erst unterhalb der Fasersättigungsfeuchte schwindet.

Zur Bestimmung der im Rahmen dieser Untersuchung wichtigsten Holzeigenschaften und Bezugsgrößen wurden folgende Untersuchungen an den Fundstücken durchgeführt:

- | | |
|---|--|
| 1. Holzfeuchte | u (Gew.%) |
| 2. Dichte | ρ (t/m^3) oder (kg/m^3) |
| 3. Druckfestigkeit parallel
und quer zur Faser | $\sigma_{D }, \sigma_{D\perp}$ (kN/m^2) |
| 4. Elastizitätsmodul
parallel und quer zur Faser | $E_{D }, E_{D\perp}$ (MN/m^2) |

zu 1. Holzfeuchte

Die Holzfeuchte u wurde entsprechend /N 18/ bestimmt, die Probengröße jedoch den jeweils nachfolgenden Untersuchungen angepaßt.

zu 2. Dichte

Die Dichte wurde in Anlehnung an /N 17/ bezogen auf das Feuchtvolumen bestimmt, d. h. es wurde die Masse der absolut trockenen Substanz auf das Feuchtvolumen bezogen, um so den Abbaugrad des Holzes deutlicher zu beschreiben, zumal die darrtrockenen Proben mit tiefen Rissen und Spalten eine eindeutige Volumenbestimmung nicht mehr zulassen. Die Volumenbestimmung der gesättigten Probe wurde durch Tauchwägung vorgenommen.

Die Dichtebestimmung setzt eine sorgfältige, durch Vorversuche festzulegende Arbeitsweise voraus. Die Proben dürfen beim "Schneiden" kein Wasser verlieren, weder durch Pressen des Messers oder der Feinsäge, noch durch Trocknung. Ein Abtupfen überschüssigen Wassers nach Wasserlagerung ist in jeweils gleicher Art und Weise notwendig.

Für die Rohdichte des Holzes gilt allgemein:

$$\rho_N = \frac{m_N}{V_N} \quad (\text{g/cm}^3)$$

m_N = Masse
 V_N = Volumen

Index N gilt für im Normalklima gelagertes Holz.

Weicht der Wassergehalt u von jenem ab, der sich im Normalklima im Gleichgewicht einstellen würde, so gilt für die Dichte:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V_u} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Der Index u kennzeichnet den tatsächlichen Wassergehalt, z. B.
 $u = 120 \%$, Dichte ρ_{120}

Ist das Holz absolut trocken (Darr-Rohdichte), schreibt man:

$$\rho_0 = \frac{m_0}{V_0} \quad (\text{g/cm}^3)$$

Da die Bestimmung des Volumens der absolut trockenen Restsubstanz (siehe Bild 20) für historische Hölzer praktisch unmöglich ist, wurde als Bezugsgröße für die Dichte die Restsubstanz m_0 des Holzes auf das Feuchtvolumen V_u gewählt und als Raumdichte ρ_r bezeichnet.

$$\rho_r = \frac{m_0}{V_u} \quad (\text{g/cm}^3)$$

$$\rho_R = 1000 \cdot \rho_r \quad (\text{kg/m}^3)$$

zu 3. Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit parallel und quer zur Faser wurde entsprechend /N 20/ "Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser" bzw. /N 22/ "Druckfestigkeit quer zur Faserrichtung" ausgeführt. Nach Auswertung der Meßergebnisse läßt sich ein Beanspruchungs-Stauchungs-Diagramm darstellen, das in Bild 21 schematisch dargestellt ist.

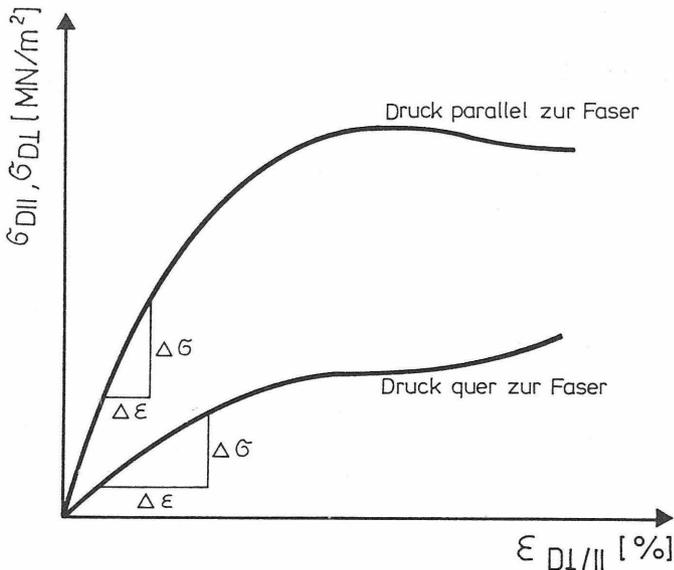


Bild 21: Druck-Stauchungs-Diagramm (schematisch)

Die Druckfestigkeit quer zur Faser ist auch bei entfestigtem Holz nicht eindeutig zu bestimmen. Das Holz zeigt bei Beanspruchung quer zur Faser ein ausgeprägt plastisches Verhalten, weil die langgezogenen Zellhohlräume im Inneren mit zunehmender Druckwirkung ohne äußere Brucherscheinungen mehr und mehr zusammengedrückt werden. Nach großem Verformungsweg tritt wieder eine Verfestigung ein.

zu 4. Elastizitätsmodul

Aus dem Druck-Stauchungs-Diagramm wird der Elastizitätsmodul E_D bestimmt.

$$E_D = \max. \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$$

$\Delta \sigma$ = Spannungsdifferenz /MN/m²/
die der Spannungsdifferenz entsprechende

$\Delta \epsilon$ = Stauchungsdifferenz / - /

Der Elastizitätsmodul E_D ist nicht identisch mit dem in der Literatur angegebenen Wert E_B /N 21/ aus dem Biegeversuch.

7.5 Ergebnisse der Untersuchungen

7.5.1 Druckfestigkeit

Für die Druckfestigkeit in Richtung (||) und quer (⊥) zur Faser konnten eine Vielzahl von Proben mit unterschiedlichem Zerstörungsgrad untersucht werden. Wegen des teilweise erheblich zerstörten Holzmaterials mit nur noch geringer Festigkeit ("weich wie nasser Keks") lag es nahe, die Probenabmessungen abweichend von den Vorgaben der DIN-Norm größer zu wählen, um für die Prüfmaschine den Festigkeiten angepaßte Kräfte beim Bruch zu erhalten.

Es zeigte sich, daß die in der Norm angegebenen Abmessungen möglichst nicht weit überschritten werden sollten, um bei Großproben wegen der verschiedenen Holzfehler und Dichteunterschiede über den Holzquerschnitt die Streuung der Ergebnisse zu begrenzen.

Wegen der hohen Inhomogenität mußten viele Proben aussortiert werden, weil häufig auch zonenweise unterschiedliche Abbaugrade von außen nach innen über den Stammquerschnitt eine Auswertung ausgeschlossen. Die Gewinnung möglichst homogener Proben ist wesentlich bedeutsamer als möglichst gleiche Probenabmessungen. Durch den optischen Eindruck einheitlicher Färbung sowie eine Abschätzung durch leichtes Eindrücken mit dem Fingernagel bei der Grobauswahl konnte erreicht werden, daß die jeweiligen Einzelproben als homogen betrachtet werden konnten.

Das von der Zellenstruktur des Holzkörpers aufzunehmende innere Stabilitätsproblem der einzelnen Zellen bei abnehmender Zellwandstärke bei der Holzzerstörung ist durch den Ansatz der mathematischen Kurvengleichung

$$y = A \cdot x^B$$

zu beschreiben. Setzt man für die y-Achse die Bruchfestigkeit $\sigma_{D||, \perp}$ -Bruch bzw. $\sigma_{D\perp}$ -Bruch und für die x-Achse die Raumdichte bzw. den Wassergehalt u, so kann mit dem jeweiligen Faktor A und dem Exponenten B die dargestellte Kurve rechnerisch ermittelt werden.

Die entsprechenden Gleichungen lauten

$$\sigma_{D||, \perp} = A \cdot u^B \quad \text{bei bekannten Wassergehalten}$$

und

$$\sigma_{D||, \perp} = A \cdot \rho_R^B \quad \text{bei bekannter Raumdichte}$$

$$\rho_R = \text{Raumdichte (kg/m}^3\text{)}$$

$$u = \text{Wassergehalt u (Gew. \%)}$$

Die für die einzelnen Auswertungen aus den Versuchsergebnissen gefundenen Beziehungen sind bei den Darstellungen in den Bildern 22 bis 25 mit angegeben.

Die Korrelations-Koeffizienten von $R \geq 0,93$ belegen eine für den gewachsenen Baustoff Holz bemerkenswert gute Übereinstimmung.

Mit den Gleichungen ist es somit möglich, für wassergesättigtes Holz bei Kenntnis des Wassergehaltes u bzw. der Raumdichte ρ_R eine zu erwartende Festigkeit rechnerisch ausreichend genau zu bestimmen.

Es ist dabei unwichtig zu wissen, aus welcher Holzart der Gründungspfahl besteht. Es wurden für die Versuche unterschiedliche Hölzer, wie Eiche, Erle und Buche verwendet. Diese Feststellung ist wichtig, denn es erlaubt auch einem mit der Holzbestimmung nicht vertrauten Gutachter eine Abschätzung der Holzfestigkeit. Allein die Dichte, d.h. der Anteil der Holzsubstanz am Gesamtvolumen bestimmt die Holzfestigkeit.

Die Grenze der Auswertung sollte dort gezogen werden, wo das Holz erkennbar nicht oder kaum zerstört ist. Diese Grenze ist nach der Raumdichte nicht genau festzulegen, $\rho_R = 600 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ ist für z.B. Erle kaum zu erreichen, bei der Eiche jedoch wird $\rho_R = 600 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ meist überschritten.

Sicher scheint eine Raumdichte von $\rho_R = 450 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ bzw. ein Wassergehalt von $u \geq 180 \text{ (\%)}$ eine Zerstörung für alle mitteleuropäischen Hölzer anzudeuten. Hier sind weitere Detailuntersuchungen nötig.

Die Bilder 22 - 23 zeigen die Ergebnisse der Prüfungen der Druckfestigkeit parallel zur Faser in Abhängigkeit von der Raumdichte $\rho_R \text{ (kg/m}^3\text{)}$ und darunter vom Wassergehalt $u \text{ (\%)}$. Die Bilder 24 - 25 geben die entsprechenden Ergebnisse für die Druckfestigkeit quer zur Faser wieder.

Trägt man beide Kurven für $\sigma_{D\parallel}$ und $\sigma_{D\perp}$ in einem Diagramm in Abhängigkeit vom Wassergehalt auf, so ergeben sich die im Bild 26 dargestellten Abhängigkeiten.

Das Verhältnis der Festigkeiten ist nahezu einheitlich 5, mit geringer Abnahme bei steigendem Wassergehalt (Bild 27). Mit genügender Genauigkeit kann festgehalten werden, daß die Druckfestigkeit quer zur Faser nur 1/5 der Festigkeit parallel zur Faser beträgt.

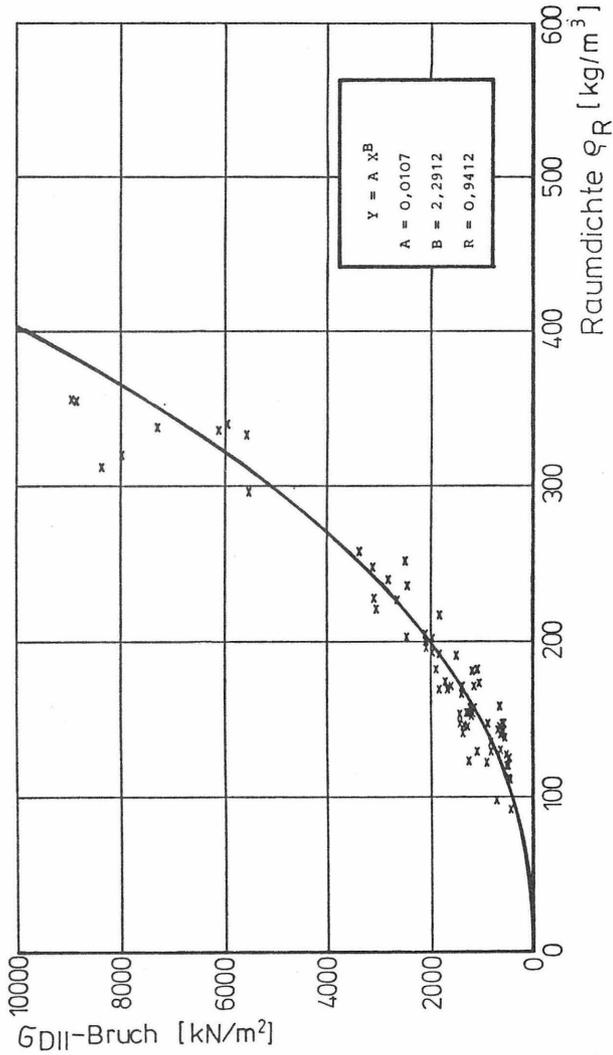


Bild 22: Druckfestigkeit σ_{DII} parallel zur Faser in Abhängigkeit von der Raumdichte ρ_R

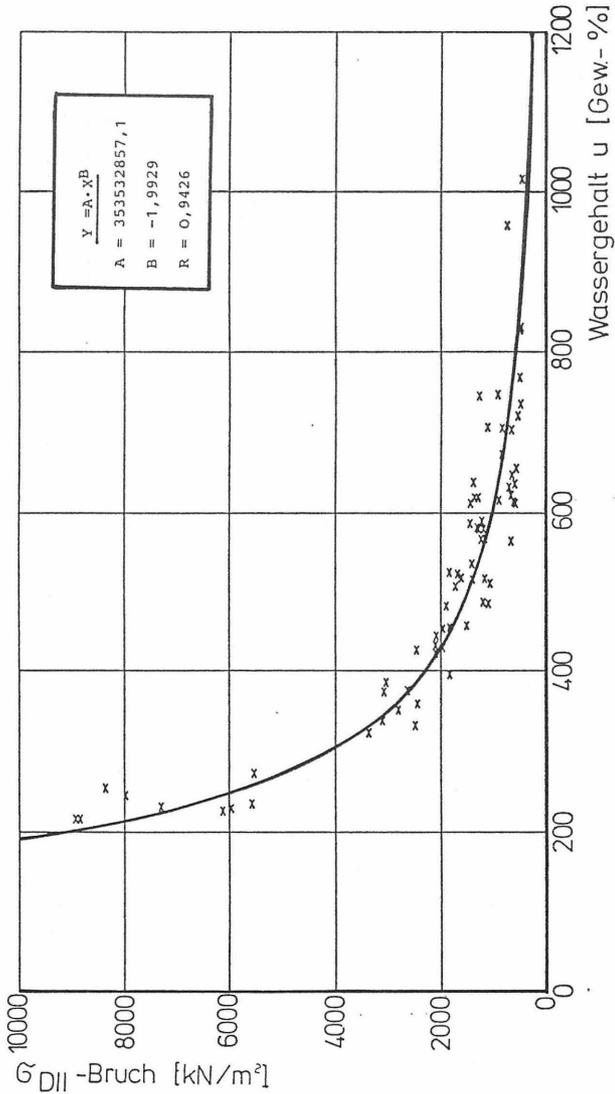


Bild 23: Druckfestigkeit σ_{DII} parallel zur Faser in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

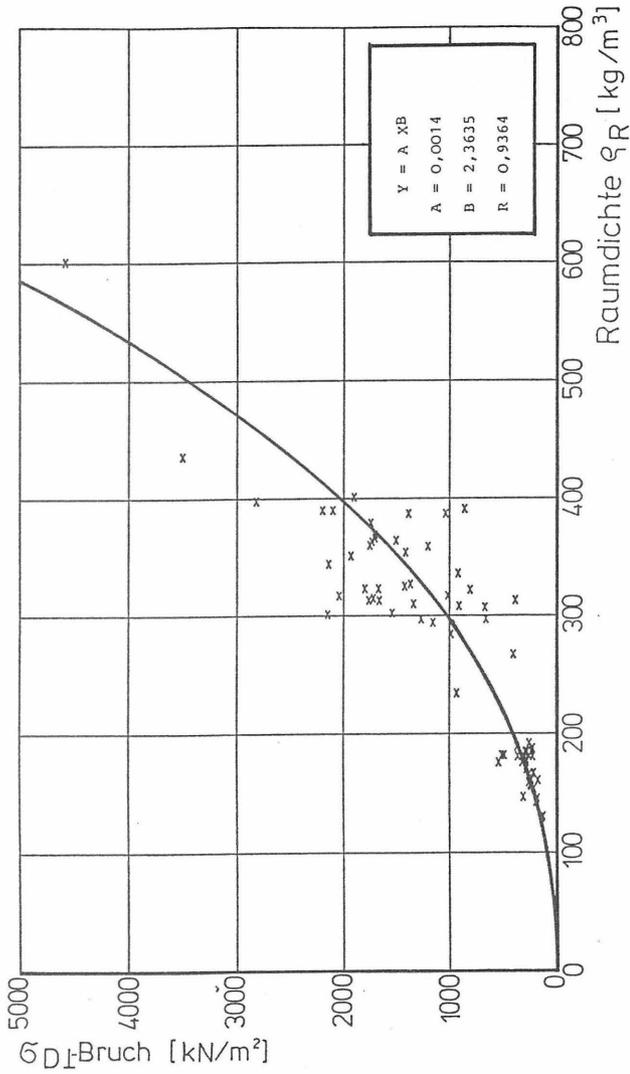


Bild 24: Druckfestigkeit $\sigma_{D\perp}$ quer zur Faser in Abhängigkeit von der Raumdichte ρ_R

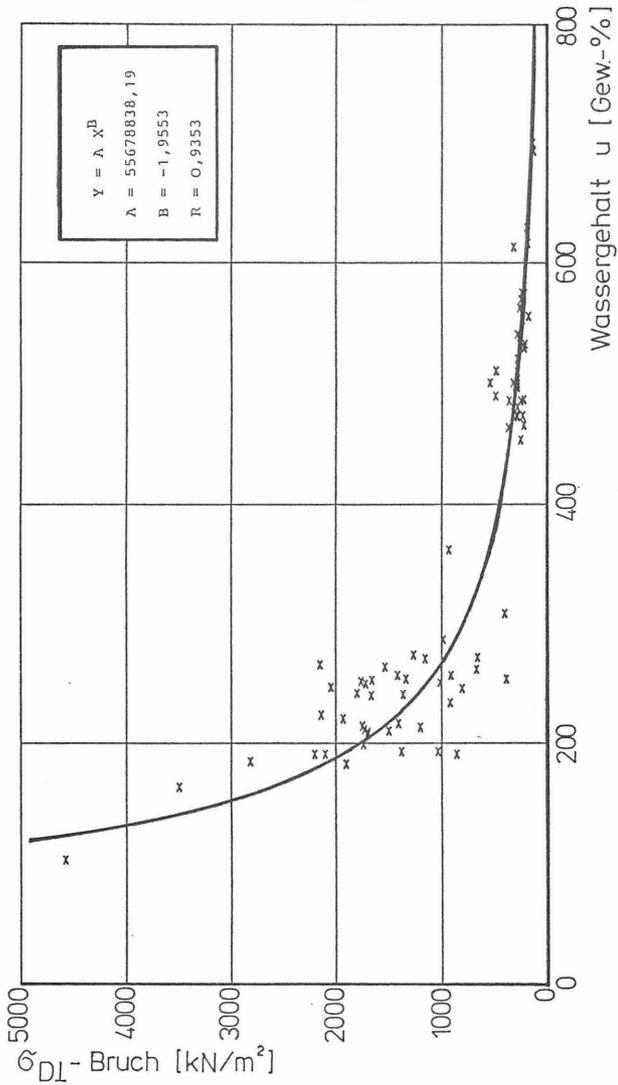


Bild 25: Druckfestigkeit $\sigma_{D\perp}$ quer zur Faser in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

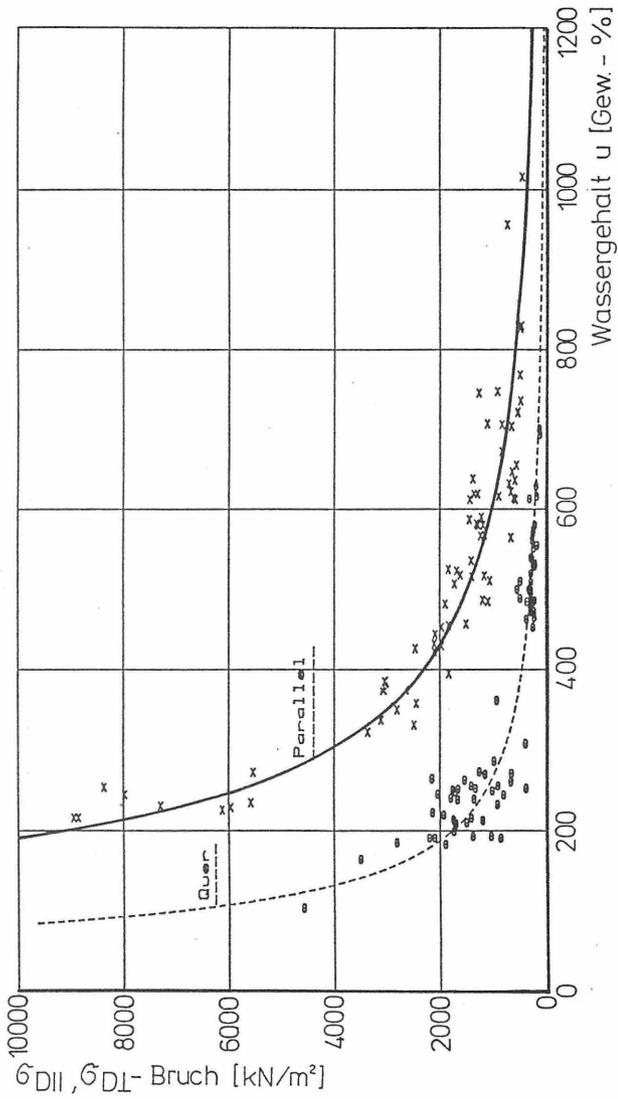


Bild 26: Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit σ_{DII} und σ_{DI} in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

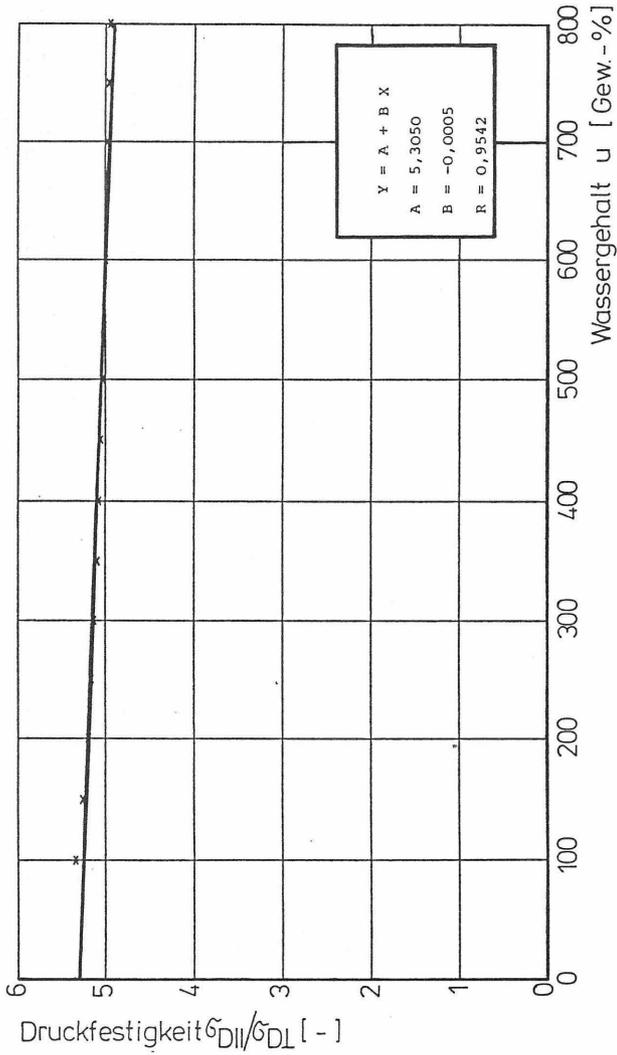


Bild 27: Verhältnis der Druckfestigkeit $\sigma_{DII} / \sigma_{DI}$ in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

7.5.2 Elastizitätsmoduli

Die in den Versuchen für Druckfestigkeit quer und parallel zur Faser abgeschätzten Elastizitätsmoduli $E_{D\parallel}$ und $E_{D\perp}$ sind in den Bildern 28 - 35 zusammengestellt. Allgemein ist bekannt, daß bereits für nasses Holz ($u > 30\%$), d. h. mit einer Feuchte über dem Fasersättigungspunkt, eine Reduzierung der Festigkeitswerte gegenüber trockenem Holz zu erwarten ist. Dies gilt entsprechend auch für den Elastizitätsmodul. Für Ramppfähle gibt das Grundbautaschenbuch /36/ eine Reduzierung auf i.M. 80 % für nasses Holz gegenüber einer Normalfeuchte an.

Die Auftragung von $E_{D\parallel}$ und $E_{D\perp}$ läßt deren gegenseitige Abhängigkeit von der Raumdichte ρ_R und dem Wassergehalt u erkennen. Das Verhältnis $E_{D\parallel}/E_{D\perp}$ zeigt - für den hier interessanten Bereich von z. B. $u > 180\%$ - einen nahezu linearen Zusammenhang von diesen Parametern. Es beträgt 7 bei schwacher und nahezu 10 bei starker Zerstörung.

Diese Versuche können nur einen ersten groben Anhalt für die Größenordnung bieten. Eindeutig ist die Erkenntnis, daß die Elastizitätsmoduli E_D für Holzproben bis zu einem Wassergehalt $u \leq 180\%$ sehr schnell abnehmen.

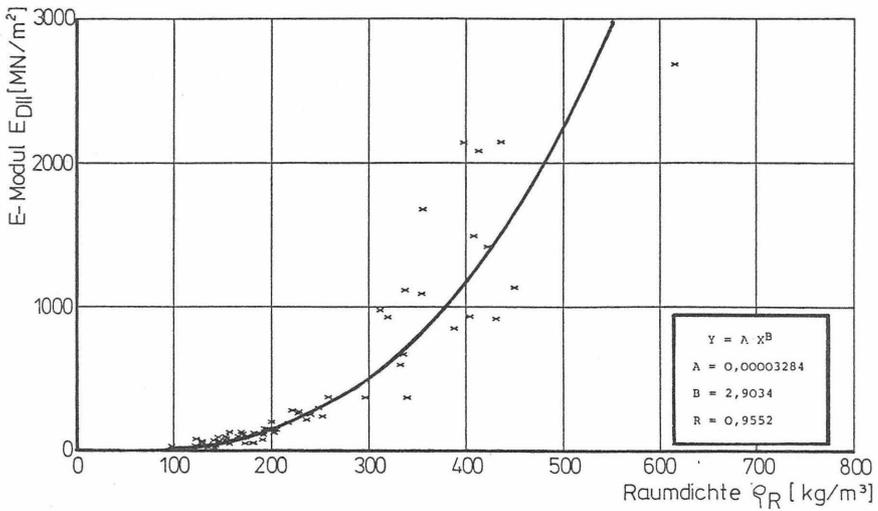


Bild 28: Elastizitätsmodul $E_{D||}$ parallel zur Faser in Abhängigkeit von der Raumdichte ρ_R

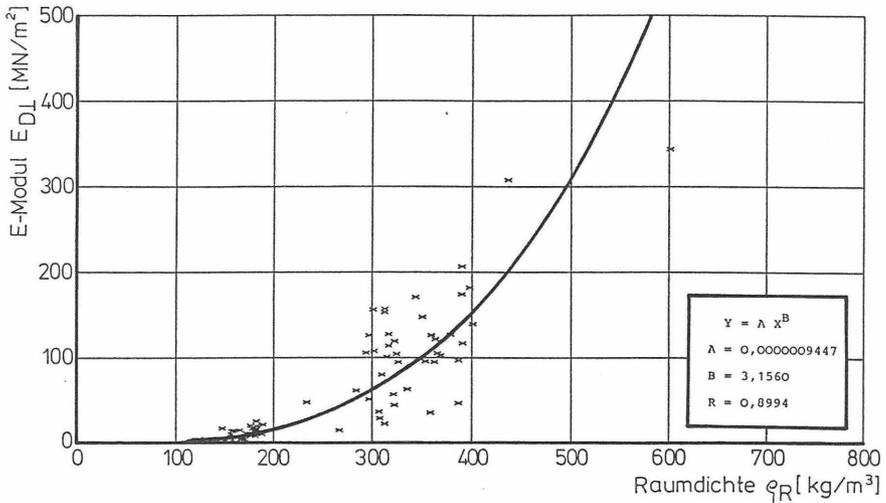


Bild 29: Elastizitätsmodul $E_{D\perp}$ quer zur Faser in Abhängigkeit von der Raumdichte ρ_R

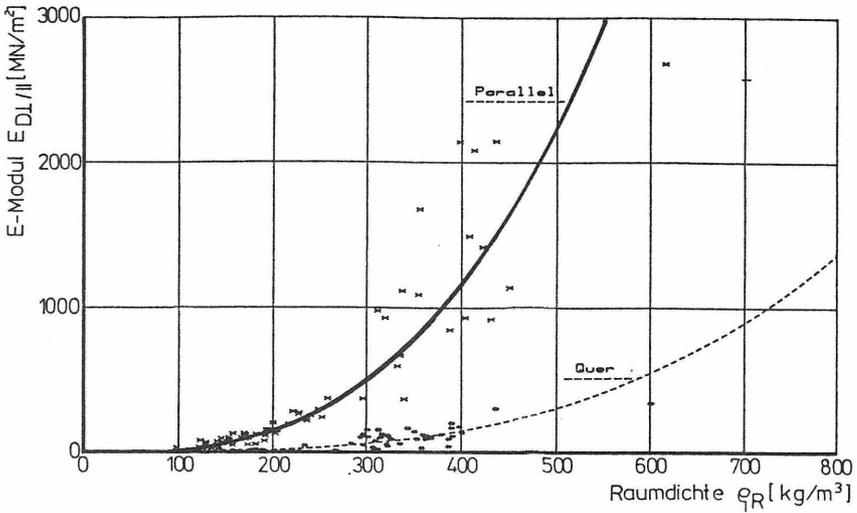


Bild 30: Elastizitätsmodul $E_{D||}$ und $E_{D\perp}$ in Abhängigkeit von der Raumdicke ρ_R

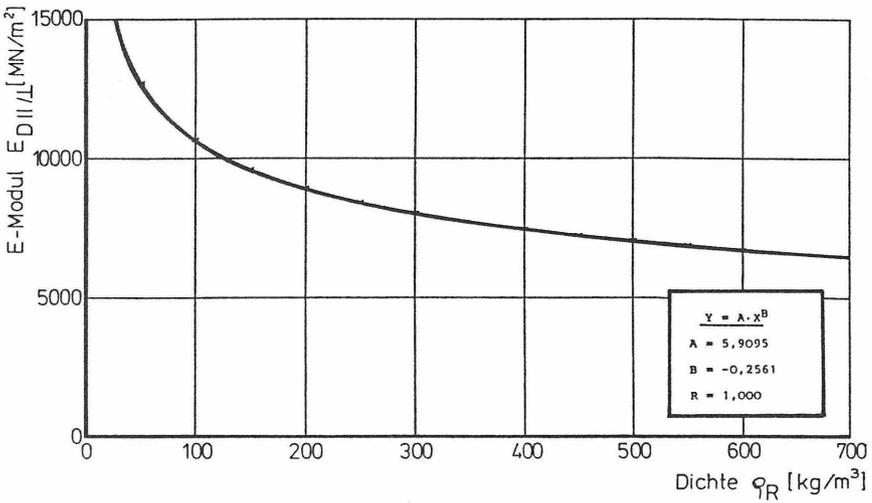


Bild 31: Verhältnis des E-Modul $E_{D||} / E_{D\perp}$ in Abhängigkeit von der Raumdicke ρ_R

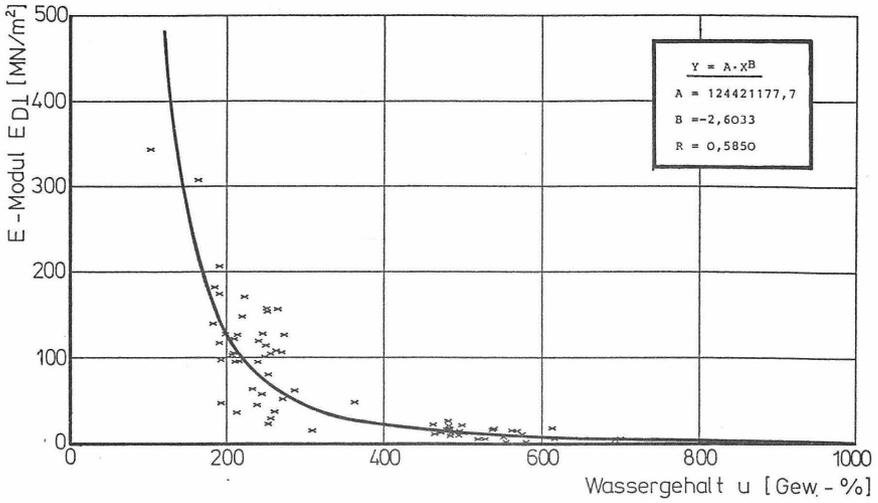


Bild 32: Elastizitätsmodul E_D quer zur Faser in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

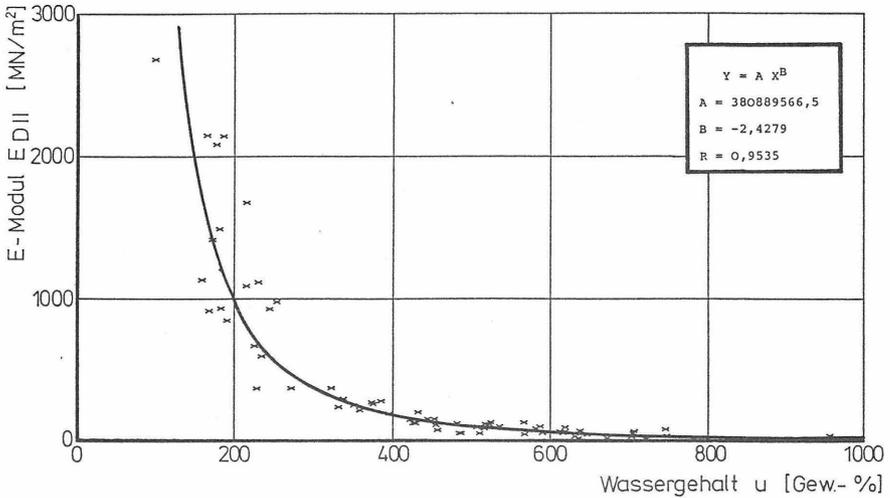


Bild 33: Elastizitätsmodul E_D parallel zur Faser in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

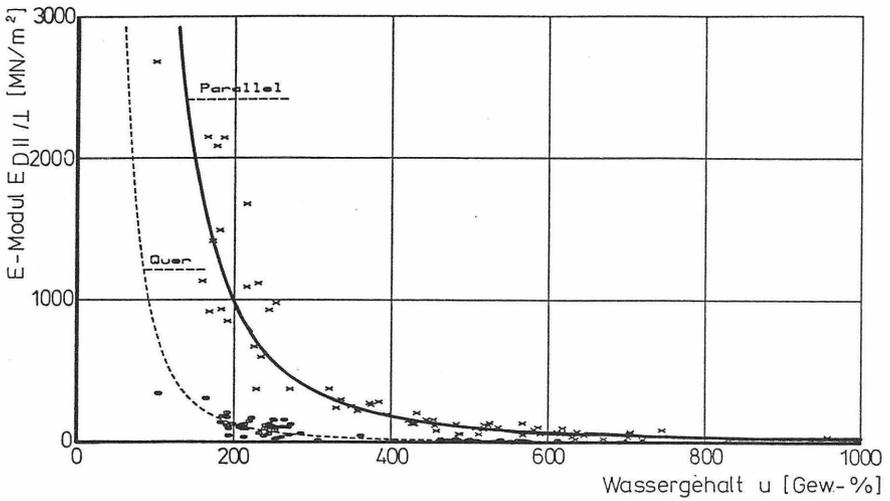


Bild 34: Elastizitätsmodule E_{DII} und $E_{D\perp}$ in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

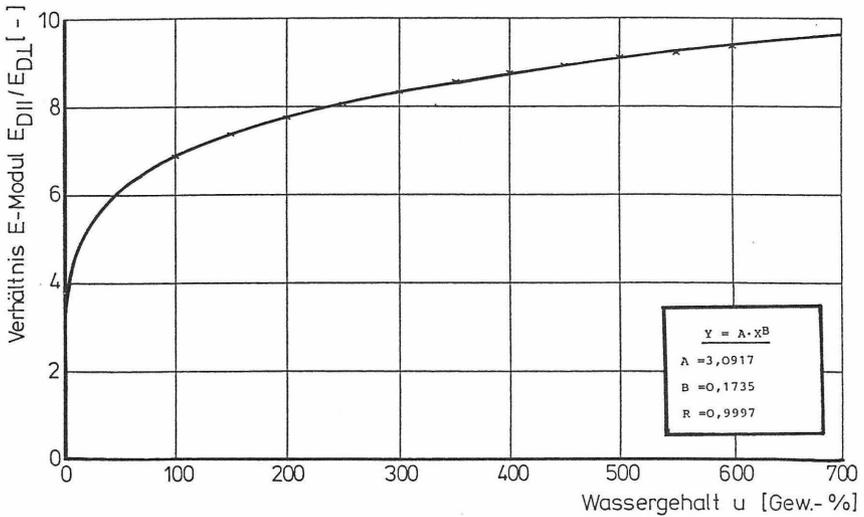


Bild 35: Verhältnis der E-Module $E_{DII}/E_{D\perp}$ in Abhängigkeit vom Wassergehalt u

8. Tragverhalten von Spick-Pfahl-Gründungen

8.1 Allgemeines

Pfähle haben in der Regel die Aufgabe, die Lasten (der Gebäude etc.) über ihre innere Tragfähigkeit als Normalkraft auf die tieferen Bodenschichten zu übertragen. Der Pfahl ist aufgrund seiner hohen Festigkeit in der Lage, große Normalkräfte auf kleiner Fläche zu übernehmen und diese erst in größerer Tiefe über Mantelreibung und/oder Spitzendruck auf die tragfähigen Bodenschichten zu übertragen.

Die Pfähle sind immer dann nötig, wenn in der Gründungssohle gering tragfähige Böden, wie weiche bindige, stark organische, oder auch lockere nasse Sandschichten (z. B. gleichförmige Fließeande) anstehen. Diese heute wesentliche Aufgabe einer Pfahlgründung hat für die Spick-Pfähle der uns bekannten historisch wertvollen Gebäude eine untergeordnete Bedeutung.

Spick-Pfahl-Gründungen unter historischen Gebäuden, zumindest in Niedersachsen, bestehen meist aus kurzen Pfählen. Ihre Aufgabe bezeichnet man heute als Baugrundverbesserung im Sinne einer Stopfverdichtung. Durch dieses "Spicken" des Untergrundes in der jeweiligen Fundamentsohle entstand ein - meist in Höhe des damaligen Grundwasserspiegels - verfestigter Baugrund aus Holz und Boden begrenzter Ausdehnung. Man war danach in der Lage, die ersten Steinquader des aufgehenden Mauerwerks der Fundamente zu setzen, ohne daß diese im weichen oder lockeren Baugrund versanken und/oder verkanteten. Die aufgeweichten Sohlen waren durch das meist anstehende Grundwasser besonders problematisch.

Es entstanden nicht selten Gründungsflächen in Fundamentsunterkante mit 50 % Holzanteil ("Mann an Mann"). Diese Pfahl-Gründungssysteme werden in der Literatur regional entsprechend ihrer Art der Einbringung - man spickte den Boden - als "Spick-Pfähle" bezeichnet (siehe Bild 5, Kap. 2).

Während die Tragkraft von Druck-Pfählen vor allem in Abhängigkeit von der Holzfestigkeit zu beurteilen ist, weil es hier einzig auf die verbleibende Holzfestigkeit im Pfahlschaft ohne Beteiligung des Bodens im oberen Bereich der Pfähle ankommt, ist das System "Spick-Pfähle - Boden" nicht geklärt, die hohe Tragfähigkeit aber offensichtlich.

Daß es so ist, ist an der Vielzahl der historischen Gebäude mit Spick-Pfählen abzulesen. Viel häufiger haben Gebäude mit flexibel angepaßtem Gründungssystem wie die Pick-Pfähle im Sinne der positiven Auslese über die Jahrhunderte überlebt; auch bei einem Holzanteil von über 50 % in der Gründungsfläche ("Mann an Mann"). Warum ist das so?

Der Spick-Pfahl erhält nicht annähernd die Normalkraft eines echten Druck-Pfahles. Wesentlich für das Verbundsystem ist die gegenseitige Stützung von Pfahl und Boden. Auffallend ist, daß selbst stark zerstörte Hölzer im Verbund mit dem umgebenden Boden in der Lage sind, die Stützung einer Flächengründung zu gewährleisten, wenn die Sohlspannung aus dem Bauwerk in Fundamentsunterkante der für den Boden zulässigen Größenordnung entspricht. Das Problem der Überbelastung unabhängig von den Spick-Pfählen - Spannungen von 0,5 - 1,0 (MN/m²) in der Gründungssohle sind nicht selten - ist nicht Gegenstand dieser Untersuchungen.

Es sind Hölzer bekannt - z. B. unter der Magni-Kirche in Braunschweig /29/ -, deren Entfestigung mit einem Wassergehalt von $u = 900$ (%) so erheblich ist, daß diese Pfähle praktisch keine nennenswerten Normalkräfte im Verhältnis zu gesundem Holz mehr übernehmen können. Wie jeder sich überzeugen kann, steht die Kirche heute noch ohne Sanierung der Spick-Pfähle.

8.2 Normalkraft-Pfähle

Durch den Einbau einer Pfahl-Gründung aus Ramm- oder Bohr-Pfählen entsteht ein Pfahl-System, das nach den im Grundbau üblichen Methoden berechnet werden kann.

Es ist anzunehmen, daß es eine größere Zahl von "echten Pfahl-Gründungen" früher gegeben haben mag; viele Bauwerke sind jedoch nicht mehr erhalten, weil allein die Pfähle - aus welchen Gründen auch immer - versagt haben.

Die Setzungen und Verformungen eines solchen Systems liegen je nach Ausführungsart und normgerechter Bemessung für die innere und äußere Tragfähigkeit bei 1 - 2 cm aber auch bis 4 cm. Meist werden die Längenänderungen der Pfähle als Folge der eingeleiteten Normalkräfte vernachlässigt, u. a. auch wegen der wesentlich größeren Verformungsanteile aus dem Baugrund und den herstellungsbedingten Verformungen.

Besonders verformungsarm sind die wegen der Verdrängung von Boden auch für historische Holzpfähle angewendeten Ramm-Pfahl-Systeme.

Die Entfestigung der Holzsubstanz hat direkten Einfluß auf das Verformungsverhalten. Die Stauchung des Pfahlschaftes bewirkt unmittelbar Setzungen und Verformungen beim aufgehenden Gebäude, die meist nicht ohne Schaden aufgenommen werden können.

Zusätzlich muß geprüft werden, ob der Kopfbereich der Holz-Ramm-Pfähle nicht bereits als Folge der Rammung beschädigt wurde. Diese mehr oder weniger mechanische Zerstörung begünstigt die spätere schnellere Zerstörung von außen nach innen. Liegt der Pfahlkopfbereich in der Nähe (1,0 m) von heute meist höherwertig genutzten Kellerräumen, so kann bei Fehlen von Grundwasser als Folge einer allgemeinen Grundwasserreduzierung hier besonders leicht eine Zerstörung durch Pilze erfolgen.

8.3 Spick-Pfähle

Die Mehrzahl der heute erhaltenen historischen Pfahlgründungen mit einem Alter von 100 Jahren und mehr wurden u. a. wegen der Rammtechniken von Hand als Spick-Pfahl-Gründungen konzipiert.

Spick-Pfahl-Systeme sind im Gegensatz zu den starren "echten" Pfahlssystemen in der Regel wesentlich dauerhafter, weil die Gebäude in Verbindung mit den Spick-Pfählen flexibler mit dem Untergrund verbunden sind. Ein Gang durch historische Stadtteile zeigt, daß das flexible Bauen in den früheren Jahrhunderten eine wesentliche Voraussetzung für die Erhaltung ist.

Zur Klärung des Tragverhaltens soll hier das Wesentliche des Tragsystems einer Spick-Pfahl-Gründung erläutert werden:

Der Baugrund bestand überwiegend aus tragfähigem Boden, lediglich die Baugrubensohlen waren wegen des anstehenden Grundwassers aufgeweicht. Bindiger Boden wurde breiig weich und Feinsande (häufig gleichförmig) reagierten auf Wasser mit Fließerscheinungen.

Es galt, nur eine "stabilere" Sohle herzustellen für die erste Lage der Fundamente aus grob bearbeiteten Steinen. Es lag nahe, das reichlich in den umgebenden Wäldern anzutreffende Holz zu verwenden.

Da den Holz-Pfählen keine "tragende" Funktion übertragen wurde, konnten fast alle Hölzer verwendet werden, bevorzugt die Erle, Birke, Pappel, Buche aber auch Eiche, weil sie in den feuchten Niederungen reichlich wuchsen und als besonders widerstandsfähig galten.

Daß Wasser bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von Gründungssohlen gleichen Untergrundes eine Rolle gespielt haben muß, wird durch Beobachtungen an Sanierungsobjekten deutlich. Die Sohle z. B. einer Kirchengründung in Münster wurde insgesamt auf einheitlichem Niveau festgestellt. Spick-Pfähle dagegen wurden nur bereichsweise angetroffen. Diese unterschiedliche Gründungsart läßt darauf schließen, daß man je nach Jahreszeit und damit Grundwasserhöhe Spickpfähle für nötig hielt oder nicht.

Historische Gebäude benötigten Jahrzehnte und länger für ihre Herstellung. Auch die Gründungsarbeiten beanspruchten viele Jahre mit den Folgen für die unterschiedlichen baugrundverbessernden Maßnahmen je nach dem jahreszeitlichen Grundwasserstand.

Die Pfähle mit einem Durchmesser von 10 - 30 cm wurden entsprechend dem jeweiligen Rammwiderstand von Hand (z. B. mit einem Dreibock, einfacher Rolle und an einem Seil befestigten Findling als Rammbar) in den Baugrund getrieben, die ersten Pfähle erreichten Tiefen von 2 - 3 m. Zwischen diese wurden weitere meist auch dünnere Pfähle angeordnet, die jedoch im vorverdichteten Boden früher endeten. Letzte "Spick-Pfähle" ergänzten die noch vorhandenen Lücken und erreichten mit Längen unter 1,0 m nur noch bescheidene Dimensionen. Die Länge der Pfähle wurde einzig nach einem sinnvollen Rammkriterium, wie etwa Anzahl der Rammschläge, für eine bestimmte Rammtiefe bestimmt.

So entstand ein System, das man als Verbundsystem Holz-Baugrund bezeichnen kann.



Bild 36: Spick-Pfähle unterschiedlicher Längen und Durchmesser

Die Holz-Pfähle hatten den Baugrund verbessert und steckten mit ihrer ganzen Länge im Baugrund. Der unmittelbare Übergang vom "steifen" Bauwerk zum "weichen" Untergrund wurde durch dieses System gemildert.

Eine willkürliche Zusammenstellung von geborgenen Pfählen mit den unterschiedlichen Längen und Durchmessern zeigt Bild 36.

Nicht selten wurden zur Lastverteilung über die ersten Pfähle waagerechte Balkenroste angeordnet, u. a. zum Fixieren der späteren Pfähle.

Dieses System hat nur noch wenig mit dem einer Pfahlgründung im klassischen Sinn zu tun. Die Belastung der Pfähle liegt in der Größenordnung der vorhandenen Sohlspannung in Unterkante Fundament, je nach der relativen "Steifigkeit" und dem Flächenanteil Holz/Boden.

Bei der Steifigkeit des Holz-Pfahles kommt es nicht so sehr auf den E_D -Modul des Holzes, sondern mehr auf die Nachgiebigkeit (relative Steifigkeit) des im Boden steckenden Pfahles an. Ein weniger fest gerammter Pfahl wird sich der Belastung durch größere Nachgiebigkeit entziehen, bis ein Gleichgewicht hergestellt ist. Diese Relativverschiebungen, verbunden mit der wuchsbedingten Pfahlform - Durchmesser der Pfähle an der Spitze i. R. meist geringer - verdichten den Boden zusätzlich.

Zu Beginn der Belastung eines solchen Systems sind die Holz-Pfähle, die im verdichteten Sand stecken, das wesentliche Tragelement. Sie sind nahezu 50 - 100 mal steifer als der umgebende Boden.

$$E_{\text{Holz}} = \text{i.M. } 8000 \text{ (MN/m}^2\text{)} \quad E_{\text{Boden}} = 60 - 100 \text{ (MN/m}^2\text{)}$$

Mit steigender Belastung stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Holz und dem umgebenden Boden ein. Setzt im Laufe der Jahrhunderte eine Auslaugung bzw. langsame Zerstörung der Holzsubstanz ein, so werden die Holz-Pfähle "weicher", allein schon durch die Wassersättigung im feuchten Untergrund.

Mit der Holzerstörung geht ein Substanzverlust einher, der durch Wasseraufnahme ersetzt wird. Das Volumen bleibt konstant, solange genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht und eine Austrocknung und damit eine dann erhebliche Schwindung ausgeschlossen werden kann.

Im nächsten Abschnitt soll der Frage nachgegangen werden, warum gerade die Gebäude auf Spick-Pfählen die Jahrhunderte besser überdauerten.

8.3.1 Triaxialversuche mit veränderlichem Innendruck

8.3.1.1 Theoretische Lösungsansätze

Bei der Suche nach einem mechanischen Ersatzmodell für das Tragverhalten eines in den Baugrund eingebetteten Spick-Pfahles können die Betrachtungen der "Spannungszustände in der Umgebung von Bohrlöchern" helfen, wie sie bereits Terzaghi/Jelinek /100/ beschrieben haben. Hierin ist für Bohrlöcher geringeren Durchmessers nachgewiesen, daß bereits eine minimale Stützung der Bohrlochwandung einen Einsturz verhindert. Übertragen auf die Spick-Pfähle im Baugrund bedeutet dies, daß der Boden auch nach einer weitgehenden Entfestigung noch eine ausreichende Stützung erfährt.

Hierzu paßt die Erfahrung, daß bei Bohrlöchern von geringem Durchmesser in bindigem Boden die Wandung des Bohrloches ohne eine innere seitliche Stützung stehen bleibt. Bei größeren Bohrungen hingegen sind Einbrüche der Wandung von einer bestimmten Tiefe ab unvermeidlich.

Terzaghi/Jelinek /100/ unterscheiden bei ihren Untersuchungen des "Plastischen Grenzzustandes" des Bodens zwischen Bohrlöchern geringen Durchmessers und großen zylindrischen Öffnungen.

Andere theoretische Betrachtungen beschreiben "rotationssymmetrische Spannungszustände" /99/ und behandeln "Hohlzylinder unter innerer und äußerer Druckbeanspruchung" /49/.

Es sind nach Smolctzyk /95/ Hohlräume unter Fundamenten festgestellt worden, ohne daß zunächst die Bauwerke Schaden genommen haben, d. h. die Hohlräume blieben zumindest für eine gewisse Zeit unter bestimmten Bedingungen erhalten.

Je nach aufgebrachtter Belastungssituation stellen sich für einen Hohlzylinder typische Bruchformen ein. Bei einer axialen Belastung unter gleichzeitig wirkendem Außendruck lassen die Spannungsrechnungen an der Innen- und Außenwand erkennen, daß die maximale Tangentialspannung σ_{ϑ} und die minimale Radialspannung σ_r an der Innenseite des Hohlzylinders auftreten.

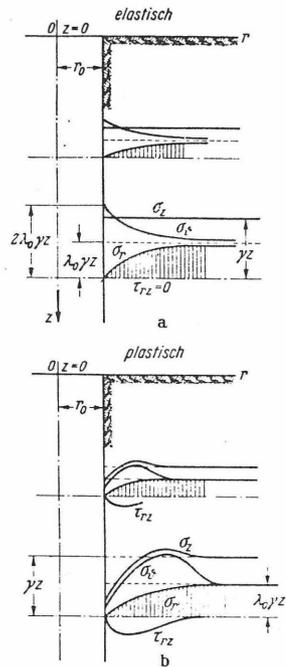
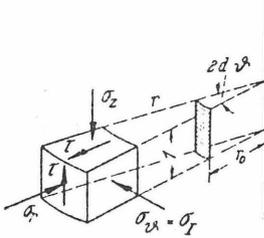


Bild 37: Spannungsverlauf auf den Seitenflächen eines Bodenelementes im Abstand zur Lochachse im elastischen und plastischen Bereich /100/

Das Versagen des Körpers - bei fehlender Stützung des Baugrundes durch Versagen des Holzes - erfolgt von der Innenseite nach außen, bei einem Wert der maximalen Hauptspannung σ_1/σ_3 , der von der einaxialen Festigkeit des Materials jedoch abweicht, die wiederum von der mittleren Hauptspannung σ_z abhängt.

Weiter wird abgeleitet, daß im Bruchzustand eines hohlzylindrischen Körpers ein dreidimensionaler Spannungszustand herrscht. Man erhält keine Bruchgeraden für unterschiedliche Bruchspannungsverhältnisse, sondern Bruchflächen (Fließflächen), deren Verlauf entscheidend von der inneren Reibung bestimmt wird.

Die vorgestellten Lösungen stellen axialsymmetrische Untersuchungen am Einzelelement dar, die nur bedingt übertragbar sind auf das Problem einer Spick-Pfahl-Gründung.

Im Bild 38 ist der Querschnitt einer Spick-Pfahl-Gründung dargestellt, aus dem das Detail I herausgetrennt zeigt, welche Bedingungen die Modellversuche in einer Druckzelle einhalten müssen. Die Idealisierung in einer kreisrunden Druckzelle ist mechanisch sinnvoll, da wesentliche Verformungs- und Kräftebedingungen den natürlichen Verhältnissen entsprechen.

Folgende Verformungs- und Kräftebedingungen konnten durch den Versuchsaufbau entsprechend den realen natürlichen Verhältnissen eingehalten werden:

1. Die äußere Belastung wird während des Versuchs konstant gehalten.
2. Die horizontale Verschiebung $\Delta h = 0$ an der Zylinderwandung entspricht der Verschiebung an der Symmetrieachse zwischen zwei Pfahlelementen.
3. Die vertikale Verformung ist frei möglich, da keine Relativbewegung der Bodenelemente in der Symmetrieachse.
4. Die Entfestigung des Holzes wird durch einen Wasserzylinder mit steuerbarem Innendruck simuliert. Einbau nur als runder Eisblock möglich!
5. Volumenkonstanz des Pfahlelementes regelbar.

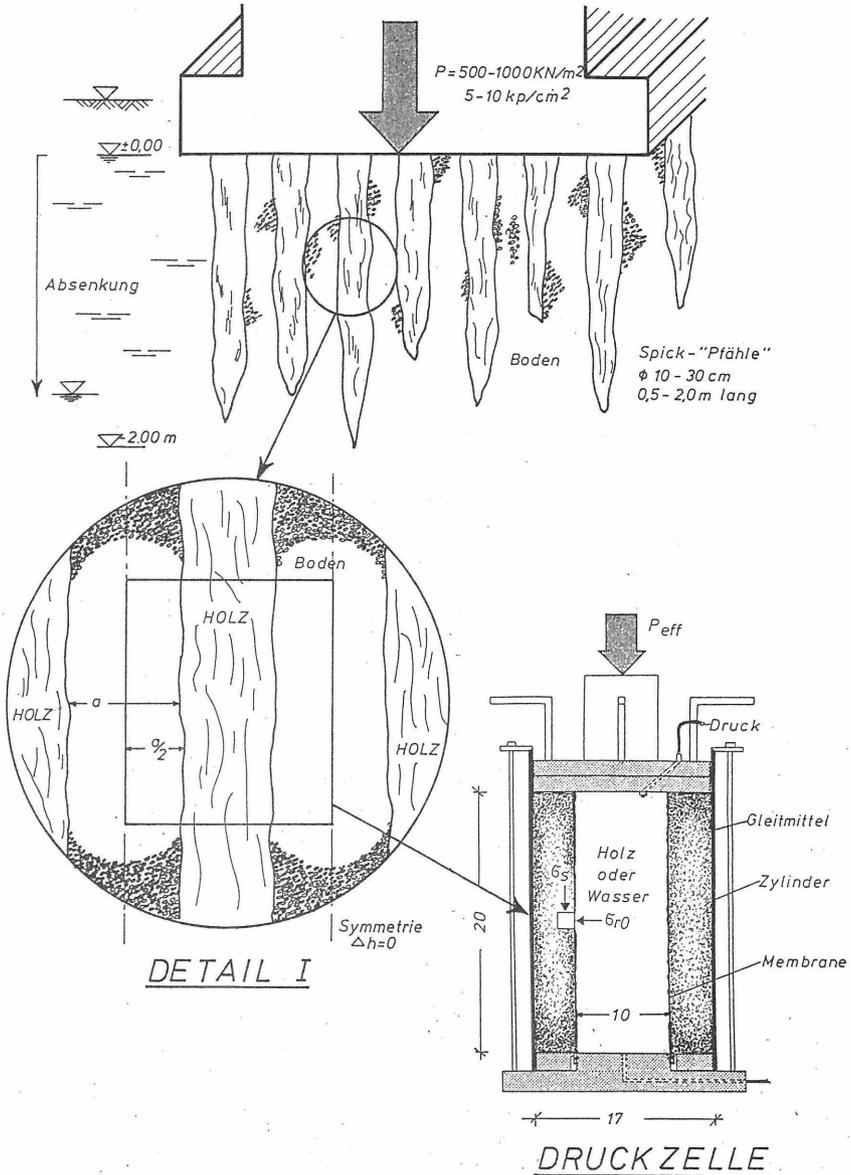


Bild 38: Spick-Pfahl-Gründung - Modellversuch

8.3.1.2 Ziel der Versuche

Versuchsanlage

Zur Überprüfung des Tragverhaltens eines Pfahlelementes im Boden - wie in Bild 38 dargestellt - wurden Triaxialversuche durchgeführt, die es erlauben, die Entfestigung des Spick-Pfahl-Elementes durch einen veränderlichen Innendruck nachzuvollziehen. Während des Versuchs wird der Innendruck der Wassersäule solange reduziert, bis ein Bruch der Bodensäule in Richtung Wassersäule eintritt. Dieser Bruch entspricht dem Versagen des Pfahlelementes unter einer konstanten Belastung aus dem Fundament des zu stützenden Gebäudes.

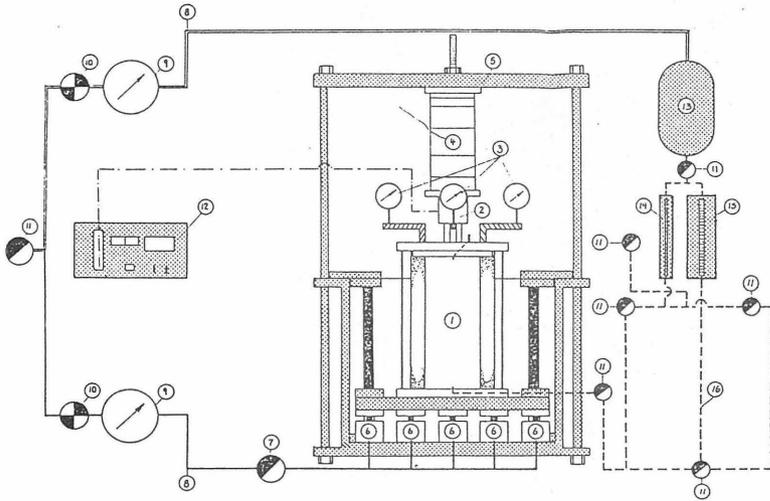
Beschreibung der Versuchsanlage

Handelsübliche Triaxialgeräte konnten für diesen Zweck nicht ohne Umbau verwendet werden. Es wurde vom Verfasser am Institut für Grundbau und Bodenmechanik aus dem vorhandenen Bestand eine Versuchsanlage entwickelt, die es erlaubt, für unterschiedliche Triaxialzellen aber auch größere Einheiten Belastungen bis zu 100 kN aufzubringen und dabei die Verformungen und Kräfte zu messen (Bild 39).

Zur Erzielung einer hohen Verformungssteifigkeit besteht der untere Teil der Versuchsanlage aus einem dickwandigen zylindrischen Hohlkörper mit fest verschraubter Grundplatte. Die 4 Säulen - mit der Grundplatte und dem Zylinder fest verbunden - sorgen über sogenannte Kugelkäfige für eine absolute Parallelführung der Hubplatte.

Der Hub der Arbeitsplatte geschieht durch fünf pneumatisch geregelte Pressen mit einer Hubbegrenzung von < 10 cm.

Eine zunächst große Schwierigkeit bereitete der Einbau des Pfahlelementes - ersetzt durch die Wassersäule - und der dann folgende Einbau des Sandes in den Ringraum in dichtester Lagerung. Dies gelang nur über den Umweg einer zunächst zu Eis erstarrten Wassersäule. Der Sand konnte dadurch hochverdichtet eingebaut werden, bevor das Eis auftaute.



Position	Bezeichnung
1	Probekörper
2	Druckmeßdose
3	Wegmessungen
4	Widerlager
5	Versuchsstand
6	Pressen
7	Regelhahn für Hub, Versuchsstop und Notentlüftung
8	Druckleitung
9	Manometer
10	Druckregler
11	Absperrhahn
12	Kompensator
13	Druckausgleichsbehälter
14	Bürette (10 ml)
15	Bürette (20 ml)
16	Wasserkreislauf

Bild 39: Prinzipskizze des Versuchsstandes

Unterschiedliche Probenhöhen können durch die Ausgleichsringe der Widerlagersäule ausgeglichen werden. An der Unterseite der Widerlagersäule ist die Druckmeßdose System "Hottinger" montiert.

Als Triaxialzelle wurde eine am Institut vorhandene "Englische Zelle" Typ EL 25-414 ϕ 170 mm für Probendurchmesser 100 mm verwendet. Für die Kräfteinleitung mußte eine zwangungsfreie Kopfplatte entwickelt werden.

Den Aufbau des Versuchsmodells zeigt Bild 40.

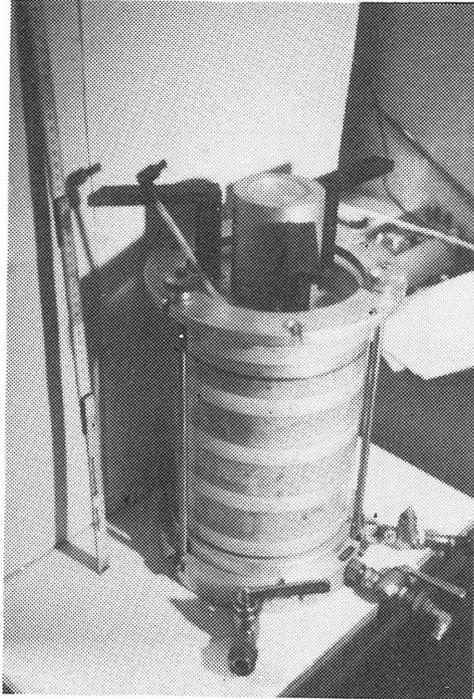


Bild 40: Aufbau des Versuchsmodells in einer Triaxialzelle

Das Versuchsmodell besteht aus der Grundplatte, der Triaxialzelle mit dem verstärkten Plexiglaszylinder, dem oberen Verspannring und den 6 Verspannstangen und der Druckplatte.

In diesem Zylinder steht der runde Prüfkörper \varnothing 100 mm, zunächst aus Eis, der von einer Gummihülle umgeben ist. Die Gummihülle wiederum wird über Dichtungsringe und Spannschellen wasserdicht mit der Sockelplatte und der oberen Druckplatte verbunden. Mit Ausgleichscheiben können die unterschiedlichen Probenhöhen ausgeglichen werden. Der Ringraum zwischen dem Pfahlelement (Wassersäule) und dem Zylinder wird mit nach der Lagerungsdichte vorgegebener Sandmenge gleichmäßig ausgestampft.

Meßtechnik

Die paßgenaue Druckplatte erlaubt die genaue Messung der Verformungen über 3 unabhängige Meßuhren, die auf der Arbeitsplatte über festmontierten Ständern fixiert sind. Die Anordnung ermöglicht die direkte Messung der Verformungen des Probekörpers.

Die Kräfte wurden direkt am oberhalb angeordneten Druckstempel über die eingebaute Druckmeßdose mit gelenkigem Pendelstützen-Oberteil gemessen.

Zur Vermeidung einer Kraftübertragung zwischen Versuchssand und äußerem Plexiglaszylinder wurde der Zylinder mit Gleitmittel geschmiert und darauf eine dünne Kunststoffolie aufgelegt.

Verschiedene Zuleitungen und Entlüftungseinrichtungen erlauben eine kontrollierte Steuerung von Volumen und Druck der Wassersäule.

Die Steuerung und Meßwertfassung wurde wegen der zunächst einfachen Verhältnisse manuell vorgenommen. Es konnten während des Versuchsablaufs die Größen

- Kraft
 - Verformung (Setzung)
 - Volumenänderung der Wassersäule
- aufgezeichnet werden.

Die Druckmeßdose mit DMS-Meßsystem gibt die Aufnehmer-Ausgangssignale an einen Kompensator DMD 20 weiter. Durch Eichung des Kompensators auf den Meßbereich der Druckmeßdose und nach Justierung des "Nullabgleichs" können die gemessenen Kräfte direkt abgelesen werden.

Die Verformungen lassen sich in den einzelnen Laststufen über 3 Meßuhren (Genauigkeit 1/100 mm) - um jeweils 120° versetzt angeordnet - direkt ablesen.

Das Volumen der verdrängten Wassermenge bis zum Bruch wird über eine geeichte Bürette abgelesen (mit Kontrolle über eine elektrische Waage). Der Meßbereich liegt bei ≤ 260 ml. Größere Veränderungen können durch Füll- bzw. Abblavorgänge im Wasserkreislauf vorgenommen werden.

Die größeren Wassermengen, die jeweils beim Bruchvorgang des Probekörpers schlagartig entweichen, werden von einem Druckausgleichbehälter aufgenommen, eine Messung der Menge ist dann nicht möglich, aber auch nicht nötig.

Der Versuchsstand wurde mit dem vorhandenen Druckluftsystem in der Versuchshalle gefahren.

Zwei über Feinmanometer (Genauigkeit 0,05 bar) regelbare Druckluftsysteme für die Druckpressensteuerung und die Steuerung des Innendrucks der Wassersäule erlauben, eine Vielzahl von Kraft-Verformungs-Abläufen zu fahren. Verlustfreie Druckregler steuern die konstanten Drücke über längere Zeit mit hoher Präzision.

Auf eine Wiedergabe der vielen Detaillösungen bis zum endgültigen Versuchsaufbau soll im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden.

8.3.1.3 Versuchssand

Der für die Versuche verwendete Sand konnte in einer Sandgrube nahe Braunschweig in ausreichender Menge gleicher Qualität jederzeit bezogen werden. Es sollte ein möglichst gleichförmiger Fein- bis Mittelsand ohne bindige Bestandteile sein, der bei Spick-Pfahl-Gründungen meist die Pfähle umgibt und bei Grundwasserzutritt zum Fließen neigt. Folgende bodenmechanische Kennwerte kennzeichnen den Modellsand:

- Korngrößenverteilung durch Sieb nach DIN 18123 /N 11/, Bild 41
- Bestimmung der Scherfestigkeit im Kastenschergerät nach DIN 18137 /N 13/, Bild 42
- Bestimmung der Scherfestigkeit im Triaxialversuch nach DIN 18137 /N 13/, Bild 43, 44
- Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung nach DIN 18126 /N 12/

Die lockerste und dichteste Lagerung ergab folgende Werte:

	Lagerung	
	lockerste	dichteste
Trockendichte $\rho_{d_{min}}$ (t/m^3)	1,47 - 1,53	$\rho_{d_{max}}$ 1,79 - 1,82
Porenanteil n_{max} (-)	0,44 - 0,42	n_{min} 0,32 - 0,31
Porenzahl e_{max} (-)	0,80 - 0,73	e_{min} 0,48 - 0,43

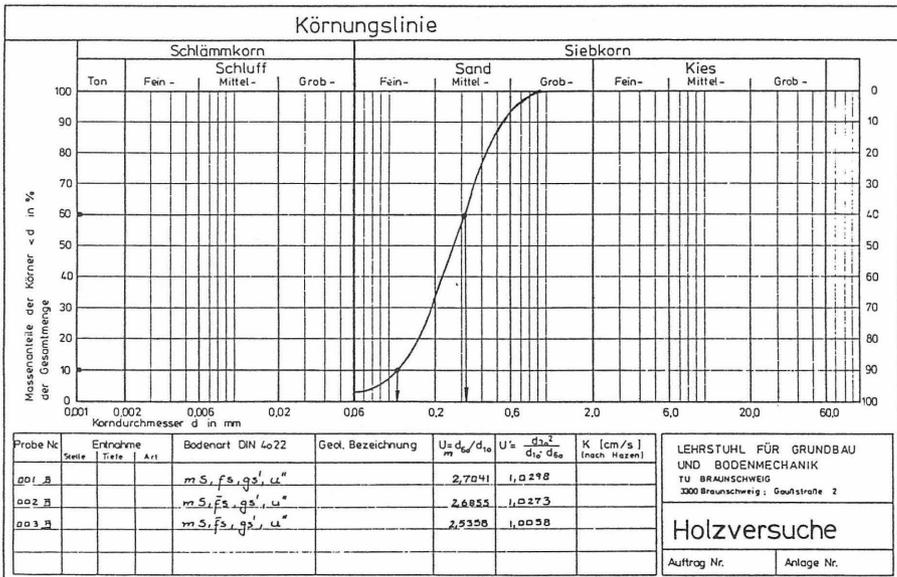


Bild 41: Körnungsgröße nach DIN 18123 /N 11/

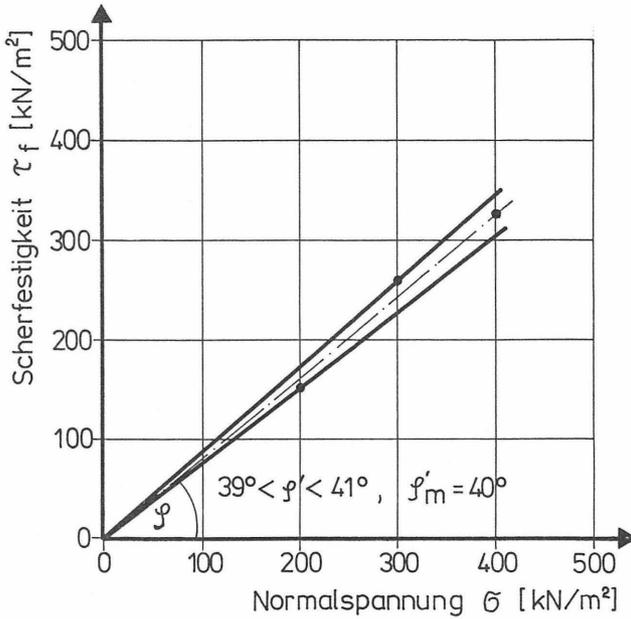


Bild 42: Scherdiagramm nach DIN 18137 / N 13/, Teil 1
(Versuch im Kastenschervergerät)

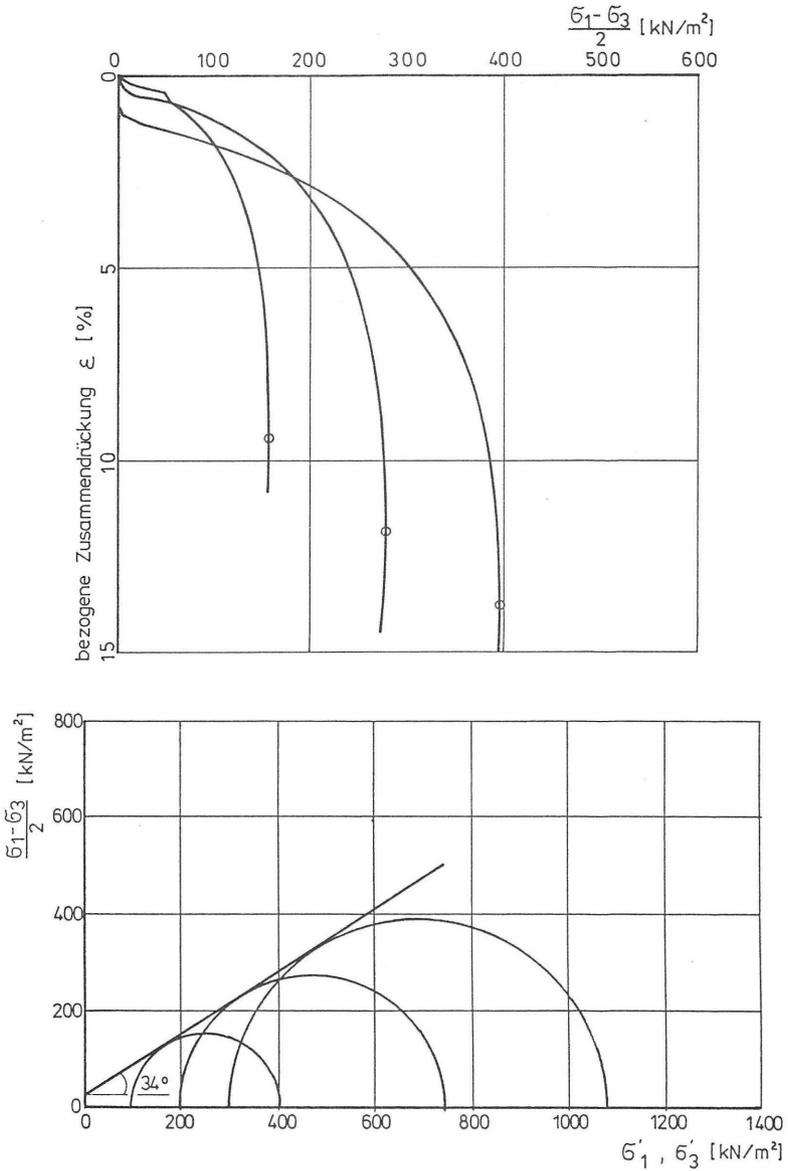


Bild 43: Scherdiagramm nach DIN 18137 /N 13/, Teil 2 für lockerste Lagerung

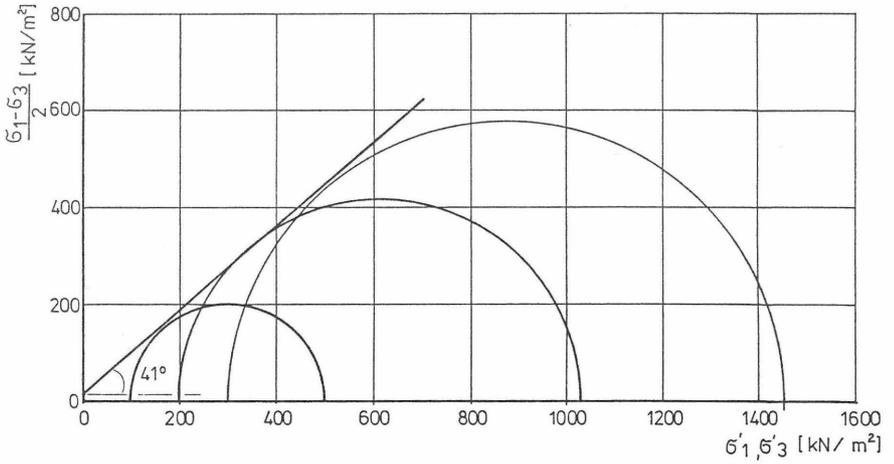
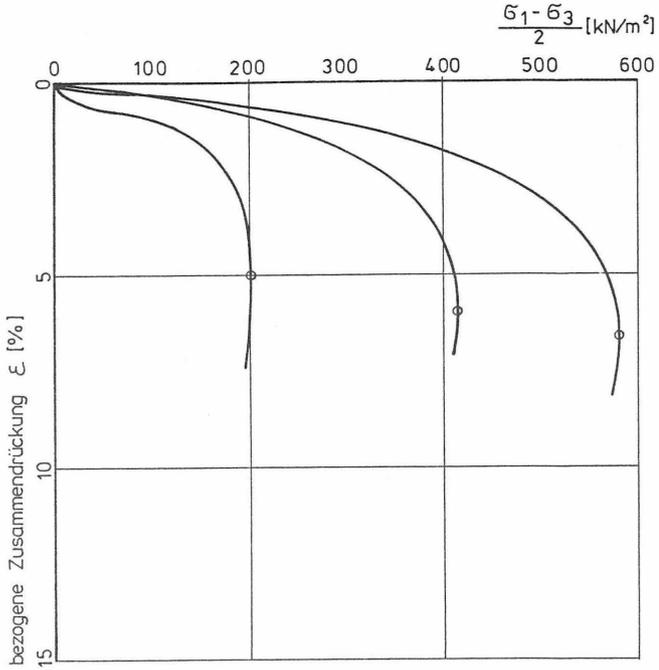


Bild 44: Scherdiagramm nach DIN 18137 /N 13/, Teil 2 für dichteste Lagerung

8.3.1.4 Probeneinbau

Erste Voraussetzung für einwandfreie Versuche war der sichere schnelle Einbau der gefrorenen Wassersäule. Der vorbereitete planparallel geschnittene Eiskörper (- 20 °C) wurde mit einer Gummihülle überzogen und dann mit Hilfe von Dichtungsringen und einer Spannschelle senkrecht auf der Grundplatte montiert. Der untere Ausgleichsring sorgte für einen einwandfreien Abschluß am Eiszylinder unter gleichzeitiger Abdeckung der Dichtelemente. Wichtig war eine vorgefrorene Grundplatte, um einem vorzeitigen Tauen vorzubeugen.

Nach dem Fixieren der Plexiglaszylinder mit den Verspannstangen geschah die Lagesicherung der Säule durch zentrisches Verkeilen zwischen Eissäule und äußerem Zylinder.

Die für eine bestimmte Lagerungsdichte und der jeweiligen Probenhöhe errechnete Sandmenge konnte mit Hilfe einer Handschaufel unter gleichzeitiger Verdichtung (Spezialhandstampfer) eingebracht werden, die einzelnen Arbeitsschritte gelangen erst nach einiger Übung sicher.

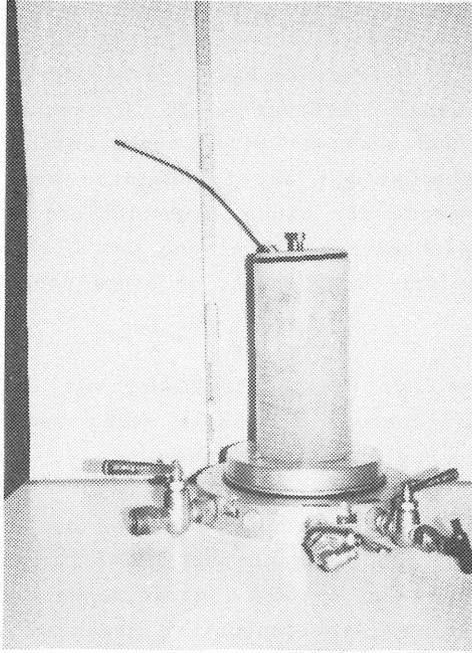


Bild 45: Eingebaute Eissäule im Versuchsstand

Nach Erreichen der erforderlichen Einbaumenge konnte das ebenflächige Abziehen mit Hilfe einer Ziehklänge geschehen, die gleichzeitig als Höhenlehre diente.

Durch eine spezielle Verschraubung zwischen oberer Ausgleichscheibe und dem Einspannzylinder wurde jeweils eine völlige Dichtung der Wassersäule unter gleichzeitigem Abschluß des Sandkörpers erreicht. Ein Austritt von Sand an der inneren Wandung des Plexiglaszylinders konnte verhindert werden.

Bild 46 zeigt den eingebauten Versuchskörper. Der Schlauch diente der Entlüftung des innen liegenden Drucksystems für die Zeit des Auftauens der Eissäule (Volumenminderung).

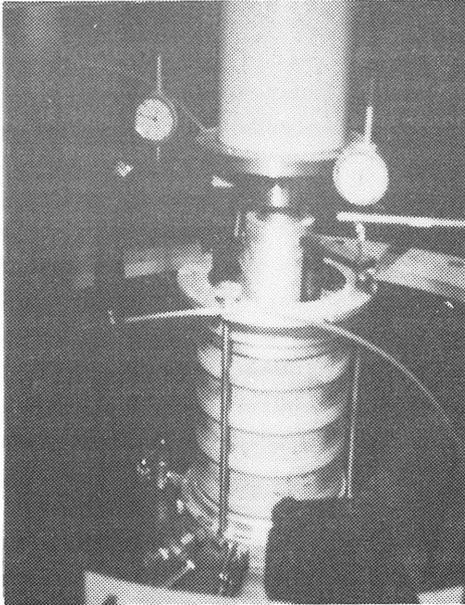


Bild 46: Eingebauter Versuchskörper

Nach dem Einbau des Versuchskörpers in den Prüfstand mußten die Druckplatten und die übrigen Teile aufgesetzt, der Versuchskörper ausgerichtet und das Drucksystems angeschlossen, Meßuhren aufgesetzt und der Versuchskörper kraftschlüssig unter dem Laststempel der Kraftmeßdose hochgefahren werden.

8.3.1.5 Versuchsdurchführung

Der nachfolgende Versuchsablauf gliederte sich in 4 Hauptteile:

- Auftauen der Säule bei gleichzeitiger Entlüftung
- Erhöhung der Auflast und gleichzeitig Innendruck des "Pfahlelementes" bis zu in der Natur üblichen Sohlspannungen zwischen
 $\sigma_s = 0,250$ bis $- 1,000$ (MN/m²)

- Reduzierung des Innendrucks bis zum Bruch
- Versuchsabschluß mit Ausbau und Auswertung

Das Auftauen und gleichzeitige Entlüften des Systems war eine zunächst technisch schwierige aber wesentliche Voraussetzung für eine ausreichende Genauigkeit der Volumenmessung, erschwert durch die Volumenverringering bei Änderung des Aggregatzustandes von Eis zu Wasser von ca. 8 %. Das fehlende Wasser konnte durch Zulauf aus dem Buretensystem ersetzt werden.

Die Erhöhung von Innendruck und Auflast wurde in der ersten Versuchsphase so gesteuert, daß das Volumen der Wassersäule unter Berücksichtigung der vertikalen Setzungen konstant blieb.

Die Auflast wurde dabei unter Beachtung obiger Bedingung gesteigert und anschließend der Innendruck auf den gewünschten Wert unter Beibehaltung des Sollwertes für die Auflast nachgeregelt.

Nach Erreichen der gewünschten Ausgangswerte von Auflast und Innendruck konnte der Innendruck über Laststufen reduziert werden, bis jeweils der Bruch eintrat. Hier galt es, bei den geringen Innendrücken mit kleinen Laststufen zu arbeiten, um mit ausreichender Genauigkeit die Bruchspannung zu erfassen.

Das Versagen des Sandkörpers wurde jeweils recht deutlich durch eine plötzliche Volumenabnahme der Wassersäule angezeigt.

Ausgehend von den Verhältnissen in situ wurden die Versuche so gefahren, daß die äußere Belastung auf den Probenkörper im Plexiglaszylinder unabhängig von dem Innendruck der Wassersäule immer einer konstanten Spannung auf den stützenden ringförmigen Sandkörper entsprach. Da der Innendruck allseitig auf die Oberfläche der Wassersäule wirkte, mußte dies bei der äußeren Belastung jeweils berücksichtigt werden.

Die effektive äußere Belastung ergab mit den geometrischen Abmessungen

$$P_{\text{eff}} = s \cdot 148,44 + r_o \cdot 78,54$$

mit P_{eff} = äußere Belastung (kN)

σ_s = gewünschte Sohlspannung (MN/m²)

σ_{r_o} = Innendruck der Laststufe (MN/m²)

A_s = Fläche des ringförmigen Sandkörpers mit Durchmesser des Plexiglaszylinders

$d_a = 170$ mm

Probendurchmesser des "Pfahlelementes"

(Eissäule) $d_i = 100$ mm

$$A_{\text{Kreisring}} = (17,0^2 - 10,0^2) \cdot 4 = 148,44 \text{ (cm}^2\text{)}$$

$$A_{\text{"Pfahlelement"}} = 10,0^2 \cdot 4 = 78,54 \text{ (cm}^2\text{)}$$

8.3.1.6 Zusammenstellung der Versuchsergebnisse

Da in erster Näherung für die Geometrie der Maßstab 1:1 angenommen werden konnte, lag es nahe, die gewünschten Spannungen für den Sand des Bodenkörpers in der Größenordnung der tatsächlichen Bodenbelastungen zu wählen, und zwar

eine hohe Belastung

$$\sigma_s = 750,0 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad 0,75 \text{ (MN/m}^2\text{)}$$

eine mittlere Belastung

$$\sigma_s = 500,0 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad 0,50 \text{ (MN/m}^2\text{)}$$

eine geringe Belastung

$$\sigma_s = 250,0 \text{ (kN/m}^2\text{)} \quad 0,250 \text{ (MN/m}^2\text{)}$$

Für den trockenen Sand wurde jeweils angestrebt, eine möglichst hohe Lagerungsdichte zu erzielen. Konnte die vorgesehene Sandmenge für eine dichteste Lagerung nicht eingebaut werden, wurde dies bei der Auswertung beachtet. Nach der Entwicklungsphase wurden 15 Versuche für die Auswertung gefahren.

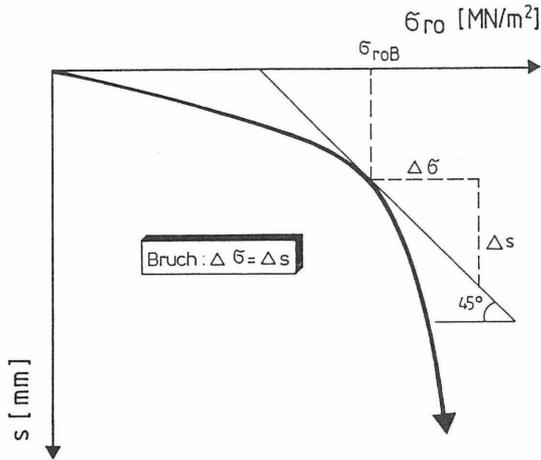


Bild 47: Bruchkriterium

Das Kriterium für den Bruch wurde, wie u. a. auch bei Probelastung für Pfahl-Gründungen, aus der Last-Setzungs-Linie bestimmt, und zwar jeweils für den Punkt festgelegt, für den die Tangente an die Last-Setzungs-Linie unter 45° verläuft (Bild 47).

Die im Bild 48 dargestellte Tabelle enthält die Versuchsergebnisse für alle 15 Versuche in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodenbelastung.

Es zeigte sich, daß ein Bruchspannungsverhältnis von im Mittel

$$\eta = \frac{\sigma_{rob}}{\sigma_s} = 0,10 \text{ ermittelt werden konnte.}$$

	1	2	3
σ_s	0,750	0,500	0,250
Versuch	[MN/m ²]	[MN/m ²]	[MN/m ²]
H 1		0,078	
H 2		0,105	
H 3		0,084	
H 4		0,150	
H 5		0,107	
H 6		0,115	
H 7		0,062	
H 8	0,113		
H 9	0,070		
H 10	0,100		
H 11	0,070		
H 12	0,080		
H 13			0,105
H 14			0,103
H 15			0,110
η_{mittel}	0,087	0,100	0,106
$\eta_{\frac{(1+2+3)}{3}}$	0,098		

$$\eta = \sigma_{\text{roB}} / \sigma_s$$

Bild 48: Tabelle der Versuchsergebnisse

Es ist zu erkennen, daß das Bruchspannungsverhältnis entscheidend von der beim Bruch erreichten Lagerungsdichte abhängt. Die Lagerungsdichte wiederum beeinflusst erheblich den Winkel der inneren Reibung.

Die Streuung der Ergebnisse ist u.a. eine Folge des Versuchsaufbaues, der Auswertung aber auch der Ungenauigkeit im Reglersystem des Versuchsstandes.

Berechnungen nach Terzaghi/Jelinek /100/ der Bruchvorgänge bei Spickpfählen, wie sie für die Spannungen auf den Seitenflächen eines Bodenelementes im Abstand zu einem Bohrloch bekannt sind, konnten durch die Ergebnisse der Versuche recht gut bestätigt werden.

8.3.1.7 Bewertung der Versuchsergebnisse

Die praktischen Versuchsergebnisse bestätigen die Hypothese, daß sich Bruchspannungsverhältnisse ermitteln lassen, wenn definierte Randbedingungen - wie in den Modellversuchen vorhanden - vorliegen.

Es zeigt sich, daß der Winkel der inneren Reibung entscheidend das Bruchspannungsverhältnis bestimmt, d.h. für die Resttragfähigkeit historischer Spick-Pfahl-Gründungen ist die Kenntnis des inneren Reibungswinkels von großer Bedeutung.

Geht man davon aus, daß der durch die Spickpfähle stark verdichtete Sand fast immer eine mindestens dichte - meist jedoch sehr stark verdichtete Lagerung besitzt - so ist die Kenntnis des Winkels der inneren Reibung bei eben dieser Lagerung wichtig. Gelingt es, eine ungestörte Probe zu entnehmen, so sollte zunächst die Dichte genau bestimmt werden, um für Scherversuche realistische Bedingungen zu reproduzieren. Weiter darf nicht vernachlässigt werden, daß feuchter Sand oberhalb des Grundwassers zur inneren Reibung noch eine scheinbare Kohäsion besitzt, die ebenfalls von größerem Einfluß ist. Für die Versuche wurde mit trockenem Sand gearbeitet, um eindeutige Randbedingungen zu haben.

Weiterhin muß die aktuelle Holzfestigkeit senkrecht zur Faser in situ bekannt sein. Mit der Kenntnis dieser Holzfestigkeit können die Standsicherheitsbedingungen einer Spick-Pfahl-Gründung für den Bruchzustand definiert werden unter Vernachlässigung der äußeren Bedingungen (Feuchte des Sandes und der verschiedenen geometrischen Verhältnisse).

Ist die aktuelle Belastung des Sandkörpers (Fundamentbelastung) errechnet (eventuell unter der Annahme, daß Holzpfähle vertikal nicht mehr zur Tragfähigkeit beitragen, Annahme auf der sicheren Seite), so muß die Holzfestigkeit für den Bruchzustand nur entsprechend dem Bruchspannungsverhältnis $\eta = 0,10$ betragen, also ein Wert der z.B. für eine Fundamentbelastung von $1000 \text{ (kN/m}^2) \approx 1 \text{ (MN/m}^2)$ nur $100 \text{ (kN/m}^2) \approx 0,1 \text{ (MN/m}^2)$ beträgt.

Nach Kap. 7 Bild 25 ist ein Holz erst bei Wassergehalten weit über $u = 600 \%$ soweit entfestigt, daß eine Gefahr für die Sicherheit des Tragsystems Spickpfähle besteht. Ein Holz bei $u > 600 \%$ ist relativ zum gesunden Holz als vollkommen "wertlos" zu betrachten, erst recht wenn dieses "Holz" zur weiteren Begutachtung der Luft ausgesetzt wird und bereits nach wenigen Tagen vollkommen seine äußere Gestalt verliert, da derart entfestigtes Holz auf Wasserentzug sofort mit erheblichen Schwindungen reagiert (siehe Kap. 7, Bild 20).

Da die ersten Versuche an einem Einzelpfahlelement vorgenommen wurden, ist zu beachten, daß die Ergebnisse nicht direkt übertragbar sind auf Spick-Pfahl-Gründungen "Mann an Mann". Für Pfahl-Gründungen wird allgemein zwischen der Tragfähigkeit am Einzelpfahl und der Gruppenwirkung unterschieden, die gegenseitige Beeinflussung ist bei einem Abstand von drei- bis fünfmal dem Durchmesser des Einzelpfahles von Bedeutung.

Der Einfluß der Gruppenwirkung von eng beieinander stehenden Spickpfählen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht näher untersucht werden. Es ist jedoch davon auszugehen, daß sich bei einer auf der sicheren Seite liegenden Holzfestigkeit die Tragfähigkeit in den Gruppen erhöhen wird.

9. Zerstörungsfreie und zerstörungsarme Untersuchungen zur Holzfestigkeit

9.1 Allgemeines

Bei Voruntersuchungen zur Standsicherheit historischer Bauwerke müssen meist wenige Schurfgruben für eine erste Untersuchung reichen, auf alte Aufzeichnungen über die Art der Gründung und des Baugrundes kann selten zurückgegriffen werden, eine Systematik ist weitgehend unbekannt (siehe Kap. 2).

Nicht selten werden die heutigen Probleme im Gründungsbereich erst durch die Eingriffe unserer Generation, wie Grundwasserabsenkungen, Verkehrserschütterungen oder Beeinträchtigung durch Nachbarbebauung wie tiefe Gruben hervorgerufen.

Das aus dem feuchten Untergrund geborgene nasse Holz trocknet an der Luft und reißt im erheblichen Maße auf. Ein gegenüber gesundem Holz festzustellender erheblicher Festigkeitsverlust und das veränderte Schwindverhalten führten in der Regel dazu, daß aufwendige Ersatzgründungen durch Unterfangungen o.ä. ausgeführt wurden, ohne das Gesamtsystem zu betrachten (Kap. 8).

Für die erste Beurteilung des Holzes ist es nötig, zerstörungsfreie und/oder zerstörungsarme Untersuchungen zu entwickeln und zu erproben. Es ist dabei das Ziel, mit einfachen - nach Möglichkeit auch aus der Geotechnik bekannten - Methoden die Festigkeit des Holzes ausreichend zu beurteilen.

Diese ersten Holzuntersuchungen müssen häufig vor Ort in einer Schurfgrube vorgenommen werden, eine Probenahme mit anschließenden Laborversuchen ist aus Termingründen nicht möglich. Diese sogenannten Schnellteste sollen einen ersten Überblick über die Holzzerstörung und damit Tragfähigkeitsverluste liefern und sollen eventuell später notwendige genaue Untersuchungen nicht ersetzen. Sicher ist mit diesen Tests eine erhebliche Kostenreduzierung für Untersuchungen zu erwarten, da bereits frühzeitig grundsätzliche Aussagen zur Holzfestigkeit möglich werden.

In Kap. 7 wurde der Zusammenhang der Holzfestigkeit mit Wassergehalt und Dichte aufgezeigt. Es liegt nahe, die Prüfmethode so zu entwickeln, daß als Ergebnis die Dichte bzw. der Wassergehalt ermittelt werden können. Diese Größen erlauben dann mit den Diagrammen des Kap. 7, Aussagen zur Holzfestigkeit parallel und quer zur Faser zu treffen. Bei zerstörungsfreien Untersuchungen ohne Ausbau des Holzes müssen die Prüfungen auf die Festigkeit quer zur Faser beschränkt werden.

Mit den Ergebnissen der Voruntersuchungen zur Holzfestigkeit, dem Alter des Gebäudes und der Art des Tragsystems liegen dann grundsätzliche Entscheidungshilfen für die erste Beurteilung vor. Sind zuverlässigere Ergebnisse nötig, so müssen in einer 2. Phase aufwendigere Untersuchungen verbunden mit der Entnahme von ganzen Holzpfählen vorgenommen werden.

9.2 Beschreibung der Methoden der Holzuntersuchungen

Aus der Literatur sind einige zerstörungsfreie Untersuchungen für gesundes und überwiegend trockenes Holz bekannt, um die sogenannte Härte zu prüfen. Bei der Härteprüfung wird der Widerstand gegen ein Eindringen eines Gegenstandes gemessen. Für Beton wird die Härte durch den Kugelschlaghammer oder Rückprallhammer (Schlagprüfung nach DIN 1048) ermittelt. Ähnliche Versuche sind auf die Belange des gesunden Holzes abgestimmt, entweder wird die Kraft für eine bestimmte Eindringtiefe oder die Tiefe für eine bestimmte Kraft gemessen. Die Ergebnisse können meist nur als grobe Schätzungen benutzt werden, dies schließt nicht aus, daß einzelne Prüfmethode für eine bestimmte Holzart und einen Verwendungszweck durchaus erhebliche praktische Bedeutung haben können, z.B. für vor Ort Prüfungen beim Holzeinkauf. Einige dieser Verfahren sind in verschiedenen Ländern in die Prüfungsvorschrift aufgenommen und haben sich dort ausreichend gut bewährt. Da die Streuung der Ergebnisse sehr groß ist - u.a. weil das Holz kein homogener Werkstoff ist - sind immer eine Vielzahl von Parallelversuchen an vergleichbaren Proben vorzunehmen, um die entsprechenden Mittelwerte zum weiteren Vergleich zu verwenden.

9.2.1 Holzprüfung mit dem Taschenpenetrometer

Ein in der Geotechnik vergleichbares und weit verbreitetes Gerät ist das Taschenpenetrometer. Es erlaubt für bindige plastische Böden durch einfaches Eindringen eines zylindrischen Stempels bis zu einer bestimmten Tiefe die Bestimmung der undränierten Anfangsfestigkeit c_u in (kp/cm^2) durch direkte Ablesung an der geeichten Scala am Schaft. Ein Schleppeziger zeigt somit indirekt die benötigte Kraft gemessen nach dem Prinzip der Federwaage an. Der Meßbereich ist auf $0-5 (\text{kp}/\text{cm}^2) \approx 5$ Teilstriche beschränkt.

Eine Eichung der aufzuwendenden Kraft ergibt eine Kraft von 20 (N) pro Teilstrich, d.h. beim Erreichen der Grenze des Meßbereiches ist ein Kraftaufwand bei $5 (\text{kp}/\text{cm}^2)$ von 100 N nötig, eine Kraft, die bei sicherem Stand mit einer Hand bewältigt werden kann.

Auf eine nähere Beschreibung des Gerätes wird im Rahmen dieser Arbeit verzichtet. Eine Standardausführung zeigt Bild 49.

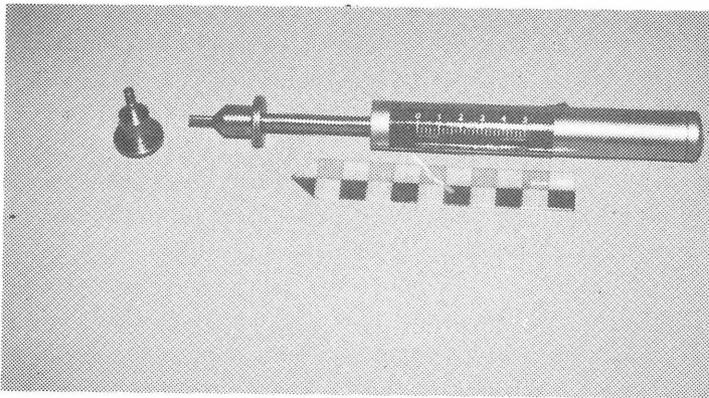


Bild 49: Taschenpenetrometer

Das Gerät ist beim Fachhandel für Prüf- und Laborgeräte zu beziehen.

9.2.1.1 Handhabung für Holzuntersuchungen

Für die Untersuchungen in situ können die Holzelemente im Boden verbleiben. Das Holz ist in einer Schurfgrube vorsichtig an der zu untersuchenden Seite freizulegen und mit einem Messer o.a. zu säubern. Bodenteile und eventuell noch vorhandene Rindenreste sind zu entfernen. Durch einen senkrechten Schnitt in Faserrichtung ist eine ebene Holzoberfläche herzustellen, die es erlaubt, das Eindringen des Druckstempels genau bis zum Markierungspunkt 6 mm in das Holz hinein zu erkennen. Die Druckkraft sollte beim Eindringen in einer Zeit von 3-4 Sekunden stetig gesteigert werden, schlagartige Bewegungen führen zu nicht vergleichbaren Ergebnissen.

Zur Erhöhung der Meßgenauigkeit und Absicherung der Werte sollten immer mehrere (mindestens 3 Messungen) in einer Ebene nebeneinander ausgeführt werden. Um eine Beeinflussung der Ergebnisse untereinander zu vermeiden, scheint ein Abstand von 5 cm ausreichend. Sind in der vorbereiteten Versuchsfläche Holzfehler wie Äste o.ä. zu erkennen, die die Ergebnisse verfälschen, so ist eine neue Fläche auszuwählen.

9.2.1.2 Ergebnisse der Versuche

Mit dem genormten Stempel des Taschenpenetrometers ist die gesamte Breite der Holzfestigkeit von weichem bis zum entfestigten Holz nicht zu untersuchen. Es galt ein System zu entwickeln, das dies erlaubt. In umfangreichen Vorversuchen im Labor wurden für den mittleren Bereich der Entfestigung, d.h. für

Wassergehalte u

$300 < u < 750$ (%)

bzw. Raumdichten R

$100 < \rho_R < 300$ (kg/m^3)

insgesamt drei Stempeldurchmesser entwickelt. Zum vorhandenen $d = 6,3$ mm des Taschenpenetrometers waren zusätzlich zwei Aufsteckzylinder mit den Durchmessern $d = 2,5$ bzw. 4 mm ausreichend (siehe Bild 49).

Für den Übergang vom gesunden wassergesättigten bis zum stärker entfestigten Holz ($u < 300$ %) kann für das System keine realistische Nadel angegeben werden, da kleinere ϕ keine Meßwerte erwarten lassen, die repräsentativ sind. Die Streuung der Ergebnisse ist wegen der unterschiedlichen Größe der Holzzellen zu groß. Hier hilft nur eine Probenahme zur Dichte- oder Wassergehaltsbestimmung. Für diesen Bereich scheinen Anprallversuche mit Messung des Kugelabdrucks sinnvoller zu sein, wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter verfolgt.

Die mit dem Taschenpenetrometer für die verschiedenen Stempeldurchmesser (siehe Bild 49) festgestellten Abhängigkeiten vom Wassergehalt u bzw. der Raumdichte ρ_R sind in den Bildern 50 - 58 dargestellt.

Ausgehend von den Ergebnissen mit dem Taschenpenetrometer ist danach über den ermittelten Wassergehalt u bzw. der Raumdichte ρ_R mit den Bildern 22 - 26 eine Beurteilung der Holzfestigkeit möglich (siehe auch Bild 58).

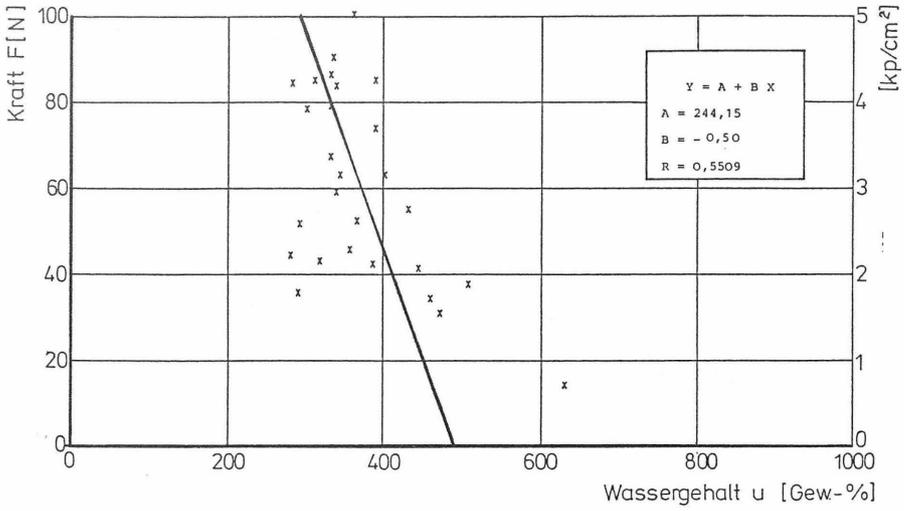


Bild 50: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel ϕ 2,5 mm über Wassergehalt u des Holzes

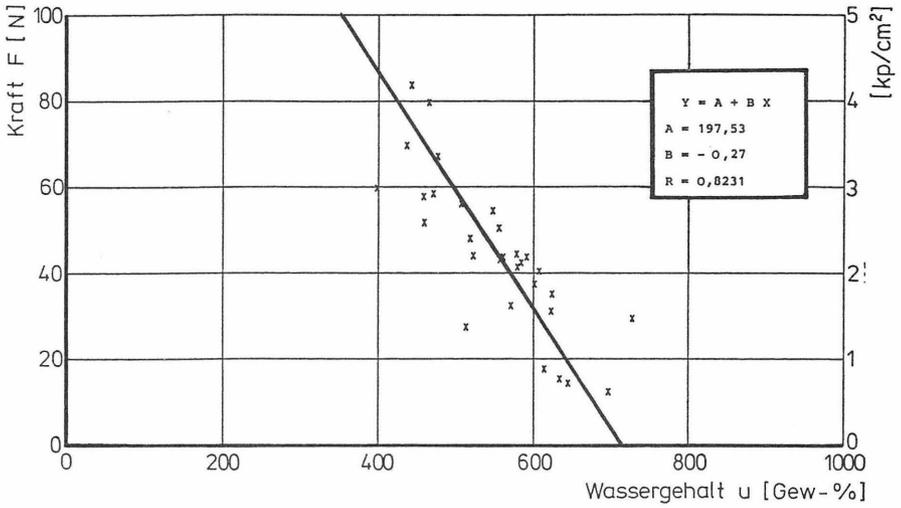


Bild 51: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel ϕ 4 mm über Wassergehalt u des Holzes

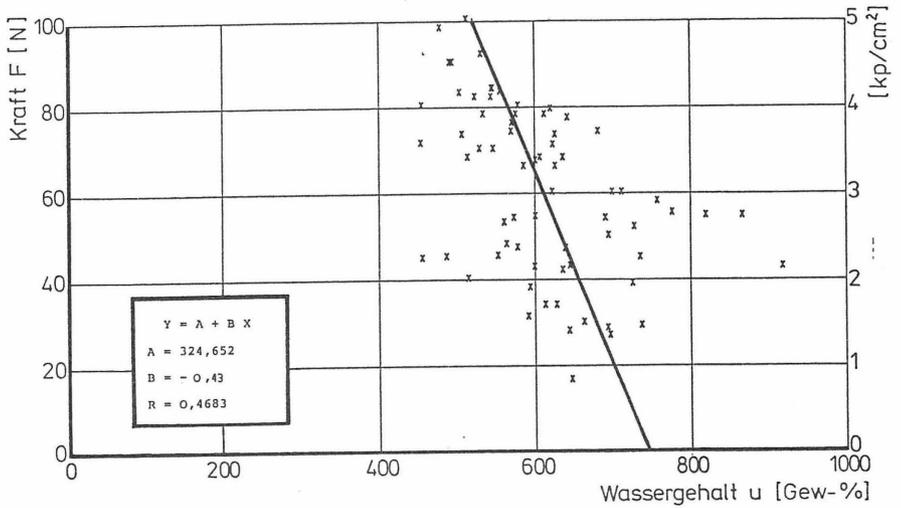


Bild 52: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel ϕ 6,32 mm über Wassergehalt u des Holzes

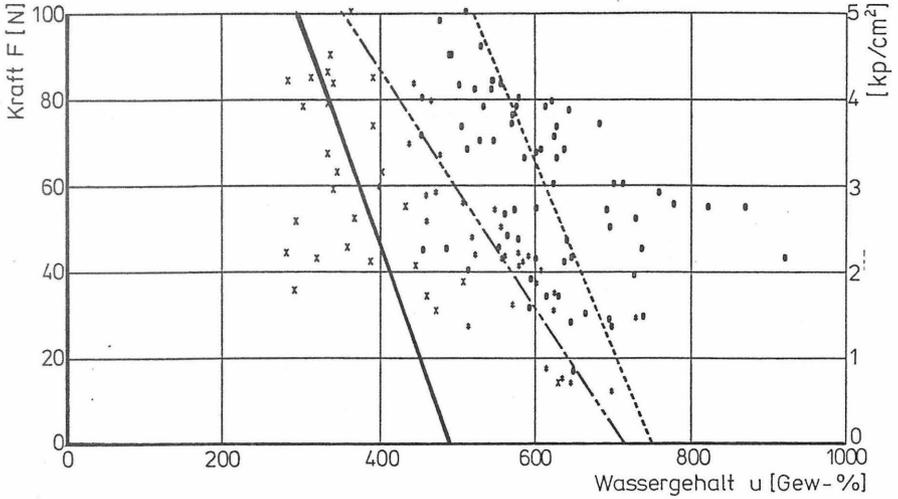


Bild 53: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel ϕ 2,5 bis 6,32 mm über Wassergehalt u des Holzes

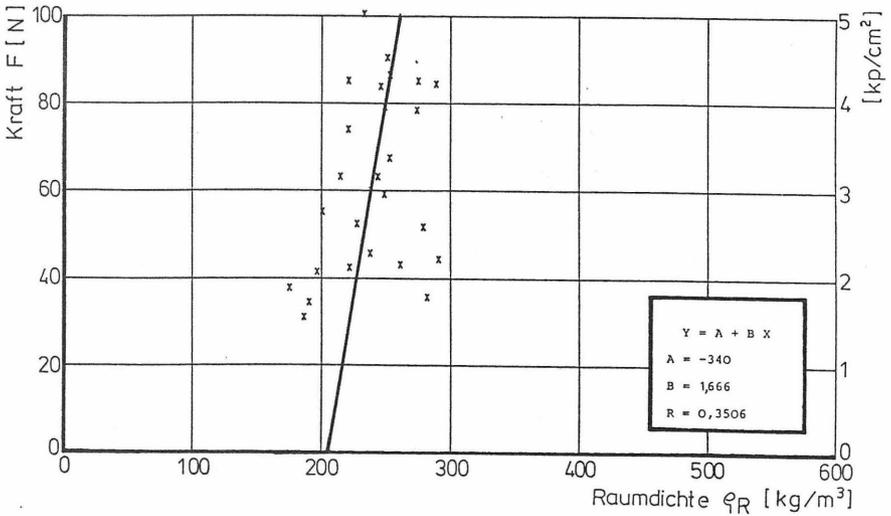


Bild 54: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel ϕ 2,5 mm über Raumdichte ρ_R (kg/m³) des Holzes

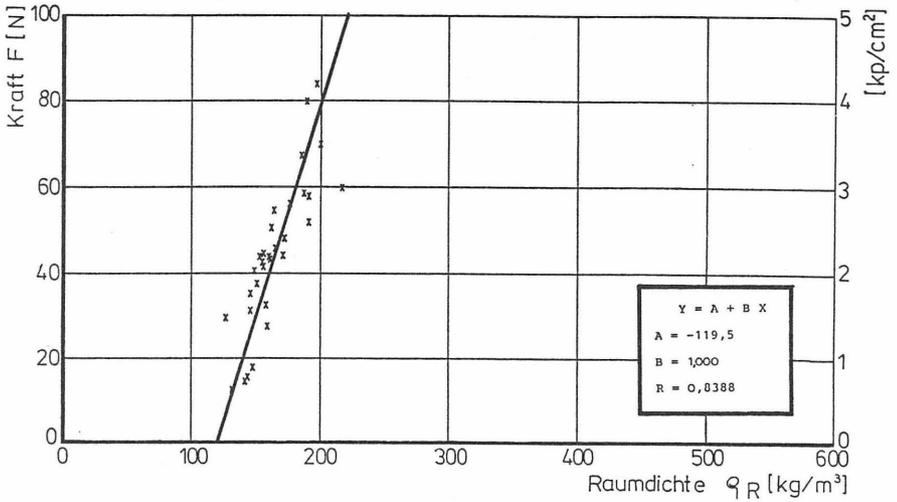


Bild 55: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel \varnothing 4 mm über Raumdichte ρ_R (kg/m^3) des Holzes

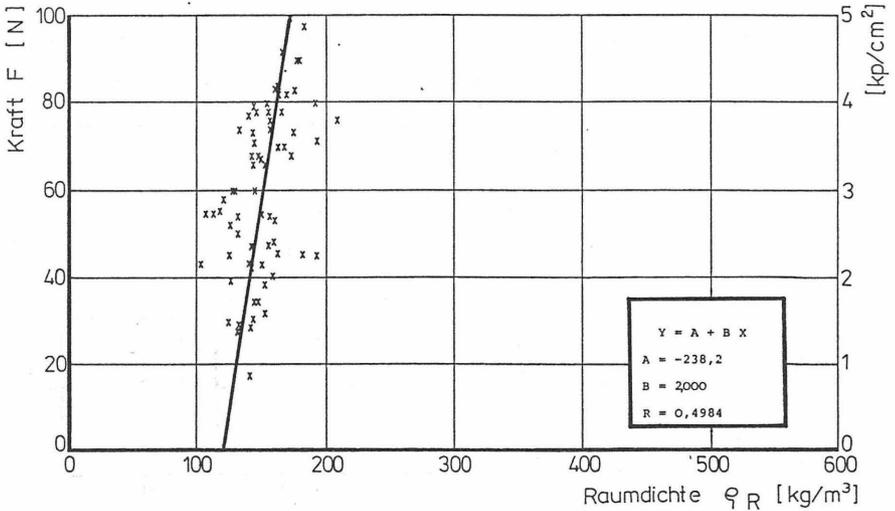


Bild 56: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel \varnothing 6,32 mm über Raumdichte ρ_R (kg/m^3) des Holzes

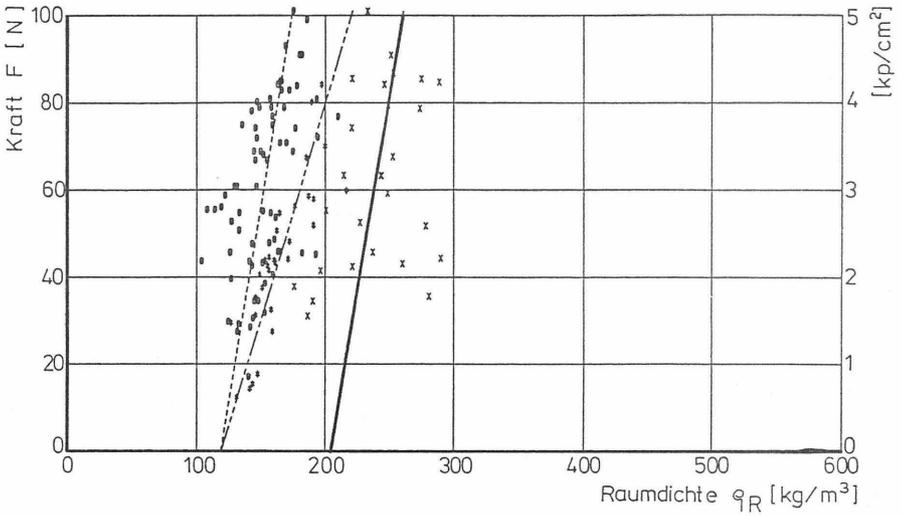


Bild 57: Ergebnisse der Taschenpenetrometerversuche für Stempel ϕ 2,5 bis 6,32 mm über Raumdichte ρ_R (kg/m³) des Holzes

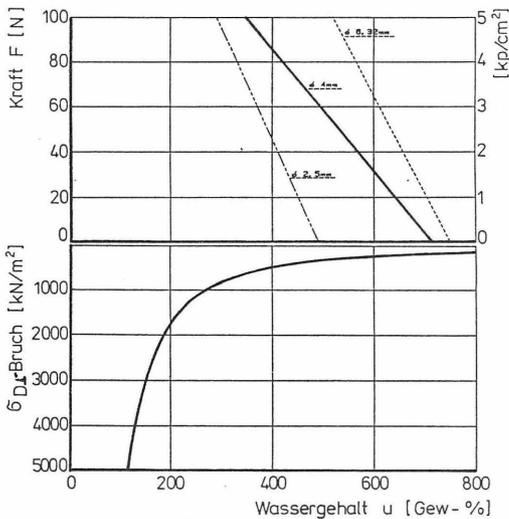


Bild 58: Zusammenhang zwischen Querdrukfestigkeit $\sigma_{D\perp}$ (kN/m²) Penetrometermessung/Wassergehalt u (Gew. %)

Erwartungsgemäß korrelieren die Ergebnisse für den Stempeldurchmesser $d = 4$ mm mit einem Korrelationskoeffizienten von $R = 0,82$ bzw. $R = 0,84$ am besten. Der Stempeldurchmesser $2,5$ mm entspricht bereits zu sehr der Zellgröße des Holzgewebes und die Ergebnisse für den Stempeldurchmesser $d = 6,3$ mm für den stark zerstörten Bereich sind von dem zufälligen inhomogenen Zerstörungsgrad am Stempeldruck abhängig. Die erhebliche Streuung der Ergebnisse für Wassergehalte $u \geq 750$ % unterstreicht dies deutlich.

Beachtet man die Abhängigkeit des Wassergehaltes u von der Raumdichte ρ_R bei diesem Zerstörungsgrad, ist die gefundene Abhängigkeit im Rahmen von Voruntersuchungen brauchbar.

Die Verformungs- und Spannungsvorgänge unter dem Druckstempel beim Eindringen in das Holz können näherungsweise mit den Modellvorstellungen des Grundbaus beschrieben werden, wenn eine gewisse Zerstörung des Holzes stattgefunden hat.

Der Stempel stellt ein hochbelastetes, starres Kreisfundament mit einem elastisch-plastischen Untergrund dar. Bei Laststeigerung kann davon ausgegangen werden, daß sich die theoretisch anzunehmende Spannungsverteilung wie unter starren Fundamenten einstellt.

Das Eindringen erzeugt durch Bruchvorgänge verdichtete Holzsubstanz, die Zellen der länglichen Zellstruktur werden beim Bruch komprimiert. Es entsteht eine räumliche Lastausbreitung im Bruchbereich.

Bild 59 zeigt die Bruchfigur unter einem Stempel $d = 2,5$ mm bzw. $d = 6,32$ mm.

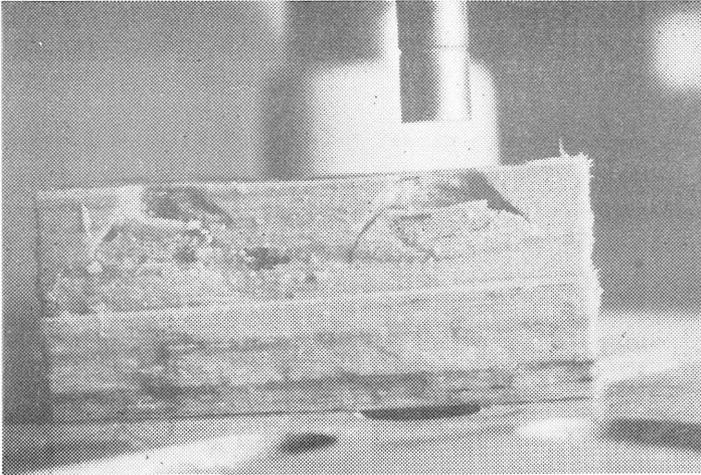


Bild 59: Bruchfigur unter Stempel eines Taschenpenetrometers

Eine der beobachteten Bruchfigur vergleichbare Näherungslösung für die Spannungsverteilung ist z.B. nach Jenne bekannt, der die Spannungsverteilung gradlinig mit einer Ausbreitung unter 45° annimmt.

Die Bruchfigur endet in einer je nach der Festigkeit des Holzes unterschiedlichen Tiefe und führt darunter nur zu einer Kompression der Holzsubstanz.

Aus der Form der Bruchfläche kann auf die Lastausbreitung geschlossen werden, diese ist in Faserrichtung auffallend unter 45° zur Lastrichtung. Quer zur Faserrichtung war praktisch keine Ausbreitung festzustellen.

Nimmt man für die Lastfläche mit der Tiefe eine elliptische Form mit der kurzen Halbachse b den Radius des Penetrometerstempels und für die lange Halbachse a den Wert entsprechend unter 45° Lastaus-

breitung an, so entspricht die Spannung in einer Tiefe, in der keine Brucherscheinungen mehr auftreten (Übergang zum elastischen Bereich) recht gut den Druckfestigkeiten aus Kap. 7 an den Detailproben.

Für die Weiterentwicklung dieser Meßmethode wird es sinnvoll sein, an einer Vielzahl von Kleinproben unterschiedlicher Entfestigung die Bruchvorgänge näher zu untersuchen. Eventuell ist eine Entwicklung mit nicht runden Stempeln sondern rechteckigen Stempeln (messerartig) dem Holz mit seiner faserartigen Längsstruktur besser angepaßt.

Viele Aufzeichnungen von Holzuntersuchungen vor Ort berichten ergänzend zu den ersten subjektiven Eindrücken einer Grabung immer wieder von Einstechproben mit einem Messer. Das Maß für die Eindringtiefe gibt dem Gutachter einen ersten subjektiven Gesamteindruck.

Für die Praxis sollte man exakte Ergebnisse mit dem Penetrometer nicht erwarten. Die Streuung der Meßwerte ist allein wegen der unterschiedlichen Zellenstruktur je nach Holzart gegeben. Großporige Hölzer bzw. radial verlaufende Markstrahlen können die Ergebnisse erheblich verfälschen, ebenso unentdeckte Holzfehler.

9.3 Holzprüfgerät "Pilodyn"

Ein für die Auswahl geeigneter Prüfmethode angebotenes Holzprüfgerät soll hier erwähnt und kurz erläutert werden, weil es grundsätzliche Aussagen über die Holzerstörung zuläßt.

Entwickelt wurde es für die schnelle Prüfung von Leitungsmasten, Eisenbahnschwellen, im Stollenbau und für tragendes Bauholz. Umfangreiche Vorversuche, dieses Gerät mit unterschiedlichen Schlagstiften ausgerüstet für eine Holzfestigkeitsbestimmung umzurüsten, hatten keinen Erfolg. Die hohe Schlagenergie ist vermutlich ausschlaggebend für den Mißerfolg. Auf eine Gerätebeschreibung wird hier verzichtet.

Dieses Gerät erlaubt die objektive Beurteilung der Zerstörungstiefe von außen nach innen im Sinne einer ja/nein Aussage.

Mit dem handlichen Gerät schießt man bei der Prüfung durch Federkraft einen Schlagstift \varnothing 2,5 mm in das Holz. An einer Scala kann die je nach Widerstand erreichte Eindringtiefe abgelesen werden. Das Eindringmaß gibt an, um wieviel der tragfähige Querschnitt durch Holzzerstörung reduziert ist. Zeitliche Wiederholungsmessungen können die Geschwindigkeit der vordringenden Zerstörung nur von außen nach innen wiedergeben, ein Maß für den Grad der Zerstörung kann das Gerät nicht liefern.

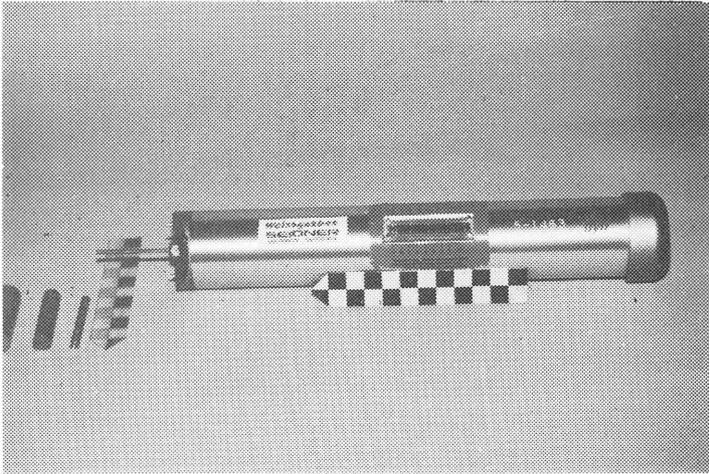


Bild 60: Holzprüfgerät "Pilodyn" (Prospekt Fa. Weißgerber + Seidner, Frankfurt)

9.4 Sonstige zerstörungsfreie bzw. -arme Methoden

Weitergehende Verfahrensauswertungen zur zerstörungsfreien Überprüfung der Holzfestigkeit wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen; es wurden zunächst einfache, dem Geotechniker bekannte Methoden bevorzugt.

Ein besonderes Problem für zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Holzprüfmethoden (non destructive testing (NDT)) ist die Anwendung in der Schurfgrube, wobei das Holz nicht einmal dem Boden entnommen, sondern nur einseitig freigelegt werden kann. Weiter werden viele Methoden durch die hohen Wassergehalte des Holzes in ihrer Aussagekraft eingeschränkt.

Grundsätzlich sind aus der Literatur u.a. folgende Methoden der Holzprüfung bekannt, aus Wenzel /111/.

- Schwingungsmessungen
- Schall (Ultraschall) Wellendurchgang
- Messen des speziellen elektrischen Widerstandes von Holz
- elastische Rückfederung mit Prallhammer
- Anwendung der Gammastrahlen
- Anwendung der Laserstrahlen
- Dielektrizitätskonstantenmessung
- Bohrkernuntersuchungen

Bohrkernuntersuchungen, wie sie Schwaab /93/ beschreibt, sind eine erfolgversprechende Methode, eine größere Zahl von Holzproben verschiedener Pfahlelemente zu entnehmen und systematische Untersuchungen der Holzfestigkeit im Labor vorzunehmen. Ein Vorteil ist weiter, ein Maß für die Holzzerstörung von außen nach innen zu gewinnen.

Die Pfähle werden bei der Entnahme der Kerne mit Durchmessern von wenigen Zentimetern nur im geringen Maße zerstört und das entstehende Bohrloch läßt sich problemlos mit paßgenauen Holznägeln aus dauerhaftem Holz wieder verschließen.

10. Einfluß der Bodenfeuchte auf entfestigte Hölzer

10.1 Allgemeines

Von entscheidender Bedeutung für die Dauerhaftigkeit von Holz im Untergrund ist die Bodenfeuchte. Ist Holz dauerhaft unter dem Grundwasser gelagert, bestehen bezüglich der fortschreitenden Entfestigung mittelfristig keine Probleme. Das Holz verliert zwar allein durch Hydrolyse auch unter Wasser an Festigkeit, die Geschwindigkeit ist jedoch so gering, daß für überschaubare Zeiträume von 50 - 100 Jahren keine wesentlichen zusätzlichen Verminderungen der Festigkeiten zu erwarten sind (siehe Kap. 5). Dies gilt nur, wenn das Grundwasser "normal" belastet ist. Sind holzerstörende Substanzen in das Grundwasser gelangt, so muß der Einfluß dieser Kontamination selbstverständlich zusätzlich beurteilt werden. Dies muß nicht schädlich sein; Holzschutzmittel gehört sicher nicht ins Grundwasser, wäre für Holzpfähle aber sicher nicht nachteilig.

Es besteht jedoch allgemein die Auffassung, daß das Holz sehr schnell zerstört werden kann, wenn das Grundwasser - dauerhaft aber auch kurzfristig - abgesenkt wird, wie es heute häufig in den Städten beobachtet werden kann.

Bei vielen Sanierungsprojekten historischer Gebäude mit Holzpfählen werden umfangreiche Unterfangungsarbeiten ausgeführt, weil wie vermutet als Folge des "Trockenfallen" das Holz der Pfähle rasch an Festigkeit verliert, die Fundamente sich unkontrolliert setzen, das Mauerwerk erhebliche Rißbildung zeigt und sogar der Bestand des Bauwerks gefährdet sein kann.

Das "Trockenfallen" wird jedoch nur für einen Teil der Holz-Pfahl-Gründungen die Ursache für eine rasche fortschreitende Zerstörung vor allem im Kopfbereich sein, eine für Normalkraftpfahlssysteme selbstverständliche nicht zu vernachlässigende Tatsache.

Bei Spickpfählen bleibt der Kontakt Boden (Holz) und Gründungssole erhalten und die Entfestigung dieser Hölzer kann weit fortgeschritten sein. Trotzdem haben diese Tragsysteme Bestand. Hinweise

auf eine einsetzende raschere Zerstörung, etwa durch Pilze o.ä., konnten nicht gefunden werden und die bei der Entnahme festzustellende Volumenschwindung an der Luft findet im Boden nicht statt (siehe auch Kap. 10.3). Worauf beruht die Stabilität solcher entfestigten Hölzer gegen Schrumpfen bei Wasserentzug der Umgebung sowie der Schutz vor einer raschen Zerstörung?

Welche Rolle spielt das im Boden eingeschlossene Porenwasser? Welche Restwassermengen bleiben erhalten?

10.2 Feuchtebewegung in porösen Stoffen

Lockergestein als Verwitterungsprodukt der auf der Erde vorhandenen Festgesteine bestehen aus einzelnen Körnern unterschiedlicher Größe. Zwischen diesen Körnern ist der Porenraum eingeschlossen, der mit Wasser und/oder Luft gefüllt sein kann.

Man spricht von 3-Phasen-Aufbau (Bild 61).

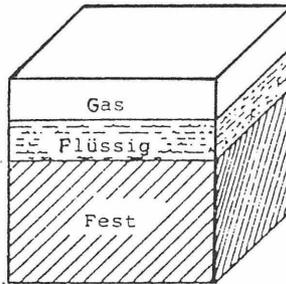


Bild 61: Boden als 3-Phasen-System

Die festen Bestandteile der Erdstoffe werden durch Körner verschiedener Größe gebildet. Die Größe bewegt sich zwischen sehr weiten Grenzen, von den kolloidalen Teilchen und großen Molekülen bis zu Steinen und Geröll. Die Korngrößenverteilungskurve gibt die mengenmäßige Verteilung wieder. In Abhängigkeit von der Kornverteilung variiert auch die spezifische Oberfläche sehr stark und hat entscheidenden Einfluß auf das Wasserbindevermögen. Die Eigenschaften des Bodens wiederum werden von der Menge des enthaltenden Wassers beeinflusst. Als Bodenwasser wird der Wasseranteil bezeichnet, der bei 105°C durch Trocknung verdampft werden kann. Das noch

verbleibende Wasser wird als Kristallwasser der Minerale des Bodens bezeichnet und der Bodenmasse zugeordnet. Das Bodenwasser wird über Niederschläge, strömendes Grundwasser und Kondensation ergänzt und enthält stets gelöste Salze und Gase in unterschiedlicher Zusammensetzung und Mengenanteile.

Je nach Bindungsart läßt sich das Wasser im Boden unterschiedlich einteilen, da das Wasser in den Poren nur teilweise frei beweglich ist. Ungebundenes Wasser unterliegt allein der Schwerkraft und besitzt keine inneren Kräfte, wie Grund- und Sickerwasser, das nach oben durch die Grundwasseroberfläche abgeschlossen wird. Ist der Boden nicht wassergesättigt, so wirken neben der Schwerkraft noch Kapillarkräfte.

Unter gebundenem Wasser versteht man das durch die Wirkung von starken Bindungskraften im Porenraum gehaltene Wasser, wie Kapillar- und Adhäsionskräfte. Diese Kräfte beruhen auf der molekularen Anziehung zwischen den einzelnen Wassermolekülen sowie den verschiedenen Kräften zwischen den Bodenteilchen und den Wassermolekülen /56/.

Wasser kann den Porenraum des Bodens vollkommen ausfüllen oder ein Teil ist zusätzlich mit Wasserdampf gefüllt, entsprechend ist der Boden gesättigt oder teilgesättigt.

Für Holz-Pfahl-Gründungen sind die Vorgänge im teilgesättigten Zustand von Bedeutung.

Es wird neben dem flüssigen Wasser auch Wasserdampf bewegt. Placzek /77/ hat für beide Aggregatzustände die Begriffe Feuchte und Feuchtebewegung verwendet, weil beide Zustände gleichzeitig im Boden auftreten können.

Es ist davon auszugehen, daß absolut trockene Porenräume im Boden in der Natur höchstens bis wenige Zentimeter unter der Oberfläche auftreten. Selbst Sanddünen in unseren Breiten sind nach wenigen Zentimetern feucht.

Tritt als Folge von Grundwasserabsenkungen eine Feuchtebewegung auf, so hat man es nach Placzek /77/ mit 3 Transportmechanismen zu tun.

1. im gesättigten Zustande

Strömung des Wassers durch die Wirkung von Kapillarkräften
(Kapillarwasserbewegung)

2. im teilgesättigten feuchten Zustand

Kapillarwasserbewegung und Bewegung von Wasserdampf
(Wasserdampfdiffusion)

3. im relativ trockenen Zustand

Wasserdampfdiffusion

Während bei der Grundwasserabsenkung zunächst die Sickerströmung durch äußere Druckunterschiede im wassergesättigten Boden verursacht werden, geschieht die nachfolgende Bewegung durch Kapillarkräfte.

Diese Kapillarkräfte entstehen stets, wo Feststoffe, Wasser und Luft zusammenkommen und werden als Linienkräfte entlang der gemeinsamen Berührungslinie bezeichnet.

Aus der Herleitung der Kapillarkräfte und Kapillarspannungen zeigt Placzek /77/, daß die Menisken der feineren Poren wegen ihres größeren kapillaren Zugvermögens aus den größeren Poren Wasser nachsaugen, d.h. daß die feineren Poren länger mit Wasser gefüllt bleiben als die größeren.

Durch die entstehende Wassergehaltsabnahme gelangt in zunehmendem Maße Luft bzw. in ihr befindlicher Wasserdampf in den Boden und es gelten die Diffusionsgesetze für die einseitige Diffusion eines Dampfes in ein Gas (Verdunstung).

Nach Scheffer/Schachtschabel /88/ beträgt der Sättigungsgrad der Bodenluft mit Wasserdampf mit Ausnahme der oberen durch Verdunstung ausgetrockneten Bodenschicht stets mehr als 90 %. Dieser Wasserdampf bewegt sich im Boden zum Ort niedrigeren Potentials. Wird Wasserdampf aus dem Boden transportiert, so wird er aus dem flüssigen Wasser durch Verdunstung ersetzt.

Wesentliche Fortschritte im Verständnis der Eigenschaften des Bodenwassers der letzten Jahre fußen nach Scheffer/Schachtschabel /88/ vorwiegend auf der Anwendung des Potentialkonzepts. Hier wird anstelle der Kräfte selbst die Arbeit betrachtet, die sie verrichten können bzw. die Arbeitsfähigkeit, das Potential. Für unsere Betrachtungen ist das Matrixpotential (ψ_m), früher auch Kapillarpotential, von Bedeutung und ein Maß für den Einfluß der Matrix, der Festsubstanz Boden, in die das Wasser eingebettet ist.

Die Beziehungen zwischen Matrixpotential, auch Wasserspannung genannt, und dem Wassergehalt ist von der Porengröße und dem Porenvolumen abhängig und daher unterschiedlich.

Der Verlauf dieses Zusammenhangs läßt mehr Rückschlüsse auf den Wasserhaushalt eines Bodens, wie Speichereigenschaften, Geschwindigkeit der Entwässerung zu, als die Körnung.

Für diesen Zusammenhang werden verschiedene Beziehungen gebracht, wie z.B. Wasserspannungskurve, pF-Kurve, Bodencharakteristik und andere. Die Wasserspannungskurven für 3 Böden unterschiedlicher Körnung sind in Bild 62 dargestellt.

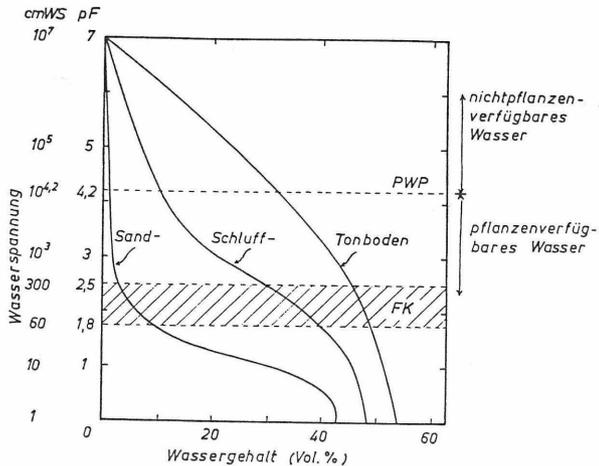


Bild 62: Beziehungen zwischen Wasserspannung und Wassergehalt (pF-Kurven) bei Sand, Schluff und Ton aus Scheffer/Schachtschabel /88/

Der unterschiedliche Verlauf der Kurven wird verursacht durch die verschiedenen Porengrößenverteilungen und stellen idealisierte Zusammenhänge dar, die von anderen Mechanismen beeinflusst werden, wie Körnung, das Gefüge und die Hysteresis bei Be- und Entwässerung.

Wird einem Sandboden Wasser entzogen, so verläuft die Kurve relativ flach bis $pF = 1,8$. Das Wasser wird relativ leicht abgegeben, da es schwach gebunden ist. Im Kapillarmodell ausgedrückt bedeutet es, daß sich dies in einem scharf begrenzten Kapillarraum über dem Grundwasserhorizont ausdrückt. Die restlichen 5 % Wasser sind mit steigender Bindungskraft gebunden.

Die Wasserdampfbewegung folgt dem Dampfdruckgefälle, als Folge einer unterschiedlichen Dicke des Films des Adsorptionswassers, der Temperaturdifferenz, der verschiedenen Krümmungsradien der Menisken und der osmotischen Druckdifferenzen. Nach Scheffer/Schacht-schabel /88/ können durch Temperaturunterschiede weitaus größere Dampfdruckgradienten zustande kommen als durch andere Faktoren, weil im Boden bei Wassergehalten mit $< 10^4$ cm WS ($pF < 4,2$) die Wasserdampfdrücke nur unwesentlich unter dem Sättigungsdruck bleiben ($P/p_o > 95$ %, Wasserdampfdruck $P/p_o = 1 \approx$ relativer Dampfdruck über einer freien Wasseroberfläche).

Unter Gebäuden, bei denen der Baugrund gegen die Außentemperatur gewissermaßen isoliert ist, kann man eine Zunahme des Wassergehalts als Folge des Dampfdruckgradienten aus Temperaturdifferenz feststellen /56/. Diese Erscheinungen werden durch Niederschläge, Einsickerung und Verdunstung beeinflusst.

Die Thermoosmose konnte im Laboratorium nachgewiesen werden /56/. Dabei wurde eine Schluffprobe einem Temperaturgefälle ausgesetzt, auf der warmen Seite nahm der Wassergehalt ab und auf der kalten Seite entsprechend zu. Die Feuchtigkeit wandert in Dampfform zur kalten Seite, schlägt sich als Kondensat nieder und vermehrt dort den Wassergehalt.

Das flüssige Wasser wiederum führt eine entgegengesetzte Bewegung aus.

Alle diese Wasserbewegungen führen zu mehr oder weniger stark ausgeprägten Veränderungen, die man als Wasserhaushalt bezeichnet.

In der Bodenkunde werden zur Beurteilung des Wasserhaushalts häufig die Begriffe der Feldkapazität (FK) und permanenter Welkepunkt (PWP) angewendet (Bild 62). Die Feldkapazität (FK) tritt bei dem Zustand auf, wenn für das hydraulische Potential $\psi_H = 0$ erreicht ist, d.h. keine Wassergehaltsveränderung mehr auftritt; in der Natur bei pF-Werten $< 2,5$. Meist ist dies zwischen pF = 1,8 bis 2,5 der Fall für Abstände von 0,6 - 3,0 m von der Grundwasseroberfläche.

Liegt die Grundwasseroberfläche sehr tief (> 3 m), wird der Boden stärker entwässert und es tritt kein Gleichgewicht ein, weil dies durch die Wasserleitfähigkeit mehr und mehr verzögert wird. Die Wasserleitfähigkeit ist die Ursache, daß in grundwasserfernen Bodenschichten selten höhere Werte als pF = 2,5 für die Feldkapazität gefunden werden, auch wenn der Abstand 10 m beträgt und sich ein pF-Wert von 3,0 einstellen müßte.

Der permanente Welkepunkt (PWP) bezeichnet den Wassergehalt, bei dem eine Pflanze nicht mehr in der Lage ist, dem Boden Wasser zu entziehen und daher "welkt". Dieser stellvertretend mit Sonnenblumen festgestellte Zustand entspricht einem Matrixpotential von pF = 4,2 $\approx 1,5 \cdot 10^4$ cm Wassersäule (WS).

10.3 Feuchtegehalt im Fundamentbereich bei gewachsenen, natürlichen Böden

Nach all den Untersuchungen ist davon auszugehen, daß im Fundamentbereich gewachsener natürlicher Boden immer ein Wassergehalt vorhanden ist. Bei allen untersuchten Bodenproben - auch aus mehrjährig abgesenkten Bodenpartien - wurden niemals Wassergehalte unter $w < 5$ % gefunden.

Placzek /77/ berichtet über einen Feldversuch zur Untersuchung über das Schwindverhalten bindiger Böden unter natürlichen Randbedingungen, daß eine Tonprobe - in einer Stärke von 35 cm mit Sand überschüttet - in über 7 Jahren kaum eine Wassergehaltsveränderung erfahren hat. Der Sand hatte beim Ausbau in Geländeoberfläche einen Wassergehalt von $w_{\bar{u}} = 6 \%$ und in Höhe der Tonprobe 35 cm unter Gelände einen Wert von $w_{\bar{u}} = 7,7 \%$.

Geht man davon aus, die bisherigen Holz-Pfahl-Gründungen bestätigen es, daß Holzpfähle nur in feinkörnigen Böden erforderlich wurden, so ist im Untergrund i.a. mit einem Wassergehalt von $w > 5 \%$ zu rechnen. Dies wiederum führt zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von nahezu 100 %, d.h. eine Wasserbewegung findet vom Holz zum Boden nicht statt, zumal die Wasserbindekräfte im Holz weitaus größer sind als zwischen Holz und dem umgebenden Sand. Ein Gegenstand gibt in einer wassergesättigten Luft praktisch kein Wasser ab. Mit plötzlichen Temperaturschwankungen und damit Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit (Unterschreiten der Wassersättigung) ist nicht zu rechnen.

Daß entfestigtes Holz an den umgebenden Boden kaum Wasser abgibt, ist unter anderem auch bei Ausgrabungen zu beobachten. Das im Boden wassergesättigte Holz verliert allein aus der Schwerkraft an der Luft Wasser. Stellt man einen für Untersuchungen geborgenen Holzpfahl auf eine undurchlässige Unterlage, so bildet sich in kurzer Zeit ein Wasserfilm auf dem Boden.

Daß Holz auch im entfestigten Zustand noch ein funktionsfähiges oder vielleicht wegen der Zerstörung wieder ein Kapillarsystem besitzt, wird durch Beobachtungen an der Gesamthochschule Essen, von Nendza (unveröffentlicht) gestützt.

Ein Holzpfahlelement (entfestigt), das ständig mit einem Ende in einem Wasserbad steht, verliert auch über Wochen bei Zimmertemperatur nicht an Gewicht, d.h., das an der Oberfläche verdunstende Wasser wird ständig in ausreichender Menge ersetzt. Diese Beobachtungen lassen den Schluß zu, daß der Holzpfahl zusätzlich in der Lage ist, seinen Wasserhaushalt in gewissen Grenzen selbst zu regulieren (Bild 63).

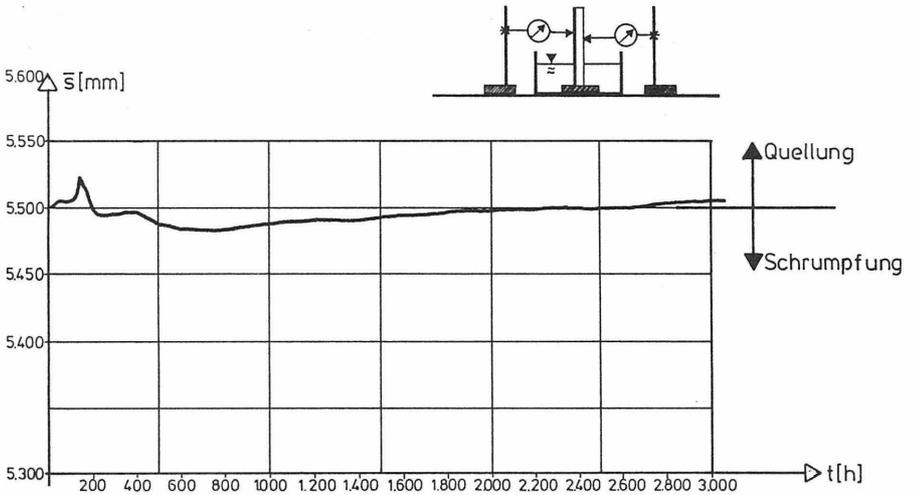


Bild 63: Saugversuch zum Schrumpf- und Quellverhalten nach Nendza (unveröffentlicht)

Versuche mit Proben entfestigter Hölzer, die im Sand unterschiedlicher Wassergehalte von $w = 4 - 14 \%$ eingebettet und luftdicht abgeschlossen waren, haben über einen Zeitraum von 140 Tagen kein Wasser abgegeben. Im Gegenteil, alle Proben haben innerhalb der ersten 2 Wochen bis zu 7 % Gewichtszunahme zu verzeichnen, d.h. die Hölzer haben zusätzlich dem umgebenden Sand Wasser entzogen. Diese Erscheinung ist mit einem geringfügigen Wasserverlust der Holzproben während der Probenzubereitung (Sägeschnitt, Zwischenlagerung etc.) zu erklären. Die fehlende Feuchtigkeit wurde dem umgebenden Sand, obwohl teilweise relativ trocken, entzogen.

11. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit über das Tragverhalten von Spick-Pfahl-Gründungen wird über die ersten Ergebnisse berichtet. Im Laufe der Bearbeitung wurde deutlich, daß diese Untersuchungen nur ein "Pilotprogramm" sein können.

Wichtigste Erkenntnis ist die wesentliche Unterscheidung der Spick-Pfahl-Systeme nach technischer Art

- Pfahlrostsysteme
- Spick-Pfahl-Gründungen als primäre Baugrundverbesserung
- echte Pfahl-Gründungen als Normalkraftsysteme

Diese unterschiedlichen Systeme haben einen entscheidenden Einfluß auf das Tragverhalten.

Pfahlrostsysteme und echte Pfahl-Gründungen wurden in dieser Arbeit nicht weiter untersucht. Ungeklärt war im wesentlichen das Tragverhalten des am häufigsten noch erhaltenen Spick-Pfahl-Systems.

Aus den Untersuchungen ergibt sich, daß gerade die flexible den Boden und die Hölzer belastende Baugrundverbesserung mit dem Spicken "Mann an Mann" eine Stützung der aufgehenden Gebäude bereits unmittelbar in Fundamentsohle bewirkt hat, die ein "Überleben im Sinne einer positiven Auslese unserer historischen Bauwerke erst ermöglichte".

Das "Spicken" des Bodens mit den Holzpfählen - zunächst längere und mit zunehmender Verdichtung auch kurze Pfähle - bedeutete einen "weichen" Übergang vom Gebäude zum Baugrund. Gerade die mit dem Einbringen der Pfähle erreichte homogene Verdichtung bewirkte das Verbundsystem Holz-Boden.

Alle Bemühungen zur Sicherung historisch wertvoller Gebäude können nur die allgemeine Zerstörung mehr oder weniger verzögern. Unsere heutigen technischen Möglichkeiten sind auf 50, vielleicht 100 Jahre begrenzt. Die Sicherung und Erhaltung wird ein ständiges Ringen sein und bleiben.

Die Untersuchungen am Beginn hatten eindeutig gezeigt, daß unsere heutigen Vorstellungen von Pfahl-Gründungen - Lastabtragung über Normalkräfte bis in tiefere Bodenschichten - bei Spick-Pfahl-Gründungen nicht weiterführen, denn die das Fundament mittragenden Hölzer hatten kaum noch eine nennenswerte Festigkeit, relativ zum gesunden Holz.

In Kap. 4 wird die Anatomie des Holzes in einfacher Form zusammengestellt, um überhaupt den Baustoff "Holz" zu verstehen. Hierfür ist die Kenntnis des makro- aber auch mikroskopischen Aufbaus wichtig, ergänzt durch Darstellungen zum Wasserhaushalt und der Kapillarität des Holzes.

Kap. 5 enthält die Untersuchungen und den Stand der Kenntnisse zur Holzerstörung im Untergrund. Hier wird besonders auf die Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Holzforschung - WKI - verwiesen. Die Kenntnisse der Mechanismen der Holzerstörung sind wichtig für die Beurteilung des Langzeitverhaltens. Eine Sanierungsmaßnahme muß auch die zukünftige Entwicklung berücksichtigen.

In Kap. 6 wird zum Problem der künstlichen Alterung von Holz durch Säureauslaugung Stellung genommen. Für realistische Untersuchungen des Verbundsystems Boden/Holz war es wünschenswert, definiert Holzfestigkeiten zu erzeugen. Erste Auslaugversuche beim Fraunhofer Institut ließen erwarten, daß es möglich sein würde, Hölzer künstlich zu altern. Das Holz hat die Angriffe von 20 %iger Schwefelsäure bei Temperaturen bis 90°C ohne wesentliche Zerstörung überstanden. Die bei kleinen Proben mit Kantenlängen von 2 cm erreichten Dichteverluste traten bei Proben mit 10 cm Durchmesser

und einer Länge von 25 cm nicht ein. Die Stahlwanne - aus Edelstahl geschweißt - war bei Abbruch der Versuche durch Lochfraß teilweise zerstört.

Die Versuche lassen den Schluß zu, daß die geringe Durchlässigkeit des Holzes im Schwefelsäurebad verhindert hat, daß das Holz "schnell" ausgelaugt wird; ein Hinweis, daß Holz im Untergrund allein durch Hydrolyse nur sehr langsam entfestigt werden kann.

In Kap. 7 werden die Versuche zur Festigkeit- und zum Verformungsverhalten (quer und parallel zur Faser) unterschiedlich abgebauter Hölzer beschrieben und die Ergebnisse in Diagrammen dargestellt. Es zeigt sich, daß es ausreicht, die Dichte eines Holzwerkstoffes zu kennen, um seine Festigkeit zu beurteilen. Ja, sogar die einfachere Wassergehaltsbestimmung - hierzu reicht eine Feinwaage und ein Trockenschrank (auch ein Backofen zu Hause) - erlaubt eine Aussage zur Festigkeit.

Wichtig ist die Feststellung, daß es bei der Festigkeit nicht auf die Kenntnis der Holzart ankommt, allein die Dichte ist entscheidend. Eiche ist nicht fester, weil es Eiche ist, sondern weil die Eiche dichter ist. Für die Dauerhaftigkeit ist selbstverständlich die Holzart von Bedeutung, hier spielen der mikroskopische Aufbau sowie bestimmte Inhaltsstoffe eine Rolle.

In Kap. 8 werden ausgehend von der bekannten hohen Tragfähigkeit von Spick-Pfahl-Gründungen - die Modellversuche beschrieben. Die Ergebnisse erklären die hohe Standsicherheit des Verbundsystems Holz-Boden. Theoretische Berechnungen zur idealen Modellvorstellung - z.B. Standsicherheit von Bohrlöchern - bestätigen die Ergebnisse. Eine geringe Stützung der Lochwanderung im Boden - beim Spick-Pfahl stützt das Holzelement den Boden - verhindert einen Bruch. Eine Stützung des Bodenelementes am Einzelpfahl von nur ca. 10 % der vertikalen Belastung des Bodens ist ausreichend, um einen Bruch zu verhindern. Dies ist eine Druckfestigkeit für Holz, die unter allen bisher gefundenen, auch stark entfestigten Hölzern bei Pfahlgründungen liegt. Selbst Holz mit einer subjektiven Festigkeit "weich wie Keks" ist in der Lage, den eingenommenen Hohlraum gegenüber dem umgebenden Boden zu halten. Die Übertragung der

Ergebnisse auf Pfähle "Mann an Mann" wurde im Rahmen dieser Arbeit noch nicht weiter untersucht.

In Kap. 9 werden erste einfache zerstörungsarme Penetrometerversuche vorgestellt, die es dem Geotechniker mit einem ihm bekannten Gerät erlauben, erste Voruntersuchungen bereits vor Ort vorzunehmen, um die Größenordnung der Holzfestigkeit zu überprüfen. Erst die aktuelle Holzfestigkeit in Verbindung mit dem Tragsystem und den Mechanismen der Holzzerstörung lassen eine erste schnelle Vorbeurteilung zu. Nach dieser ersten kostengünstigen Analyse kann über weitere Maßnahmen, wie eingehendere Detailuntersuchungen in Abhängigkeit von den Sanierungsalternativen entschieden werden.

Für die zukünftige Entwicklung ist zu hoffen, daß diese Darstellung der Problematik der Spick-Pfahl-Gründungen helfen wird, die Sicherung unserer wertvollen Bausubstanz zu gewährleisten. Viele starren Unterfangungen früherer Jahre wären vielleicht nicht - oder noch nicht - nötig gewesen. Die weitere vertiefte Kenntnis des Tragverhaltens wird helfen, dem Tragverhalten schonendere angepaßtere Sanierungstechniken zu entwickeln und auch anzuwenden.

Die Sicherung unserer historischen Bausubstanz ist inzwischen eine von der Gesellschaft anerkannte Aufgabe. Leider sind viele Kenntnisse und Fähigkeiten aus den früheren Jahrhunderten heute unbekannt und müssen wieder "ausgegraben" werden.

Erst dieses Wissen erlaubt den wirklichen Verhältnissen angepaßte Lösungen. Nicht wenige Sanierungen mußten nach einigen Jahren als gescheitert betrachtet werden, weil grundlegende Kenntnisse zur historischen Bausubstanz fehlten. Das Nachspüren alter Meister ist auch oder gerade für den heutigen Ingenieur eine wissenschaftlich interessante und auch lohnende Aufgabe.

Literaturverzeichnis

- /1/ Alberti, L. B.:
De re aedificatoria Libri X
Zehn Bücher über die Baukunst Florenz 1485
Zitatübersetzung aus Straub, H. (1964)
- /2/ Bätcke, W.:
Tragfähigkeit gedrungener Körper im geneigten Halbraum
Mitteilung des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik
TU Braunschweig, Heft Nr. 7 (1982)
- /3/ Bassett, R. H.:
The use of physical models in design
7. Europ. Conference of Soil Mechanics and Foundation
Engineering (1979), Brighton
- /4/ Bednar, H., Fengel, D.:
Physikalische, chemische und strukturelle Eigenschaften
von rezentem und subfossilem Eichenholz
Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 32 (1974), S. 99 - 107
- /5/ Binding, G., Nussbaum, N.:
Der mittelalterliche Baubetrieb nördlich der Alpen in
zeitgenössischen Darstellungen
Darmstadt (1978)
- /6/ Bosshard, H. H.:
Holzkunde, Band 1 - 3
Basel - Stuttgart (1974)
- /7/ Bohm, H., Pramborg, B.:
Foundation Documentation for Conservation Planning
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Voll. III 9/4

- /8/ Bossard, H. H.:
Gedanken zur mikrotechnologischen Holzforschung
Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 32 (1974), S. 167 - 168
- /9/ Boutelje, J. B., Kiessling, H.:
On water-stored oak timber and its decay by fungi and
bacteria
Arch. Mikrobiol. 49 (1964), S. 305 - 314
- /10/ Boutelje, J. B., Bravery, P. F.:
Observations on the bacterial attack of piles supporting
a Stockholm Building
J. Inst. Wood Sci., London (1968), S. 47 - 57
- /11/ Boutelje, J. B., Göransson, B.:
Bakteriell nedbrytning av palvirke
Byggmästaren 49 (1970), S. 25 - 28
- /12/ Boutelje, J. B.:
Nedbrytning av palvirke i kvarteret
Cadmus, Stockholm
Byggmästaren 49 (1970), S. 29 - 34
- /13/ Boutelje, J. B., Göransson, B.:
Decay in wood construction below the ground water table
Swedish J. agric. rec. 5 (1975), S. 113 - 123
- /14/ Braun, H. J.:
Lehrbuch der Forstbotanik
Stuttgart (1982)
- /15/ Braun, H. J.:
Das Hydrosystem bei Bäumen
Naturw. Rundschau, Heft 3 (1966), S. 92 - 100
- /16/ Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau:
Sanierung historischer Stadtkerne
Schriftenreihe "Stadtentwicklung" 02.002, Bonn (1975)

- /17/ Burmester, A.:
Änderung von Festigkeitseigenschaften des Kiefernholzes
durch Alterung
Materialprüfung, Düsseldorf 9 (1967), Nr. 7, S. 267 - 270
- /18/ Busch, K. F.:
Die Kapillarität des Bodens
Wasserwirtschaft - Wassertechnik, 6. Jg., Heft 5 (1956)
- /19/ Colberg, O., Nowak, A.:
Grund- und Mauerwerksbau
3. Auflage, Verlag W. Ernst & Sohn, Berlin (1922)
- /20/ Delorme, A.:
Mooreichen als Forschungsobjekte
Holz-Zentralbl. 100 (1974), S. 901 - 902
- /21/ Dzbenski:
Untersuchungen über Adsorption und Quellung von Eichen-
holz aus Ausgrabungen
Holztechnologie, Leipzig, 11 (1970), Nr. 1, S. 57 - 62
- /22/ Engel, J.:
Constructieve aspecten van de restauratie van de Nieuwe
Kerk, Amsterdam
Polytechn. tijdschrift/bouwkunde 35 (1980), Nr. 12,
S. 706ff
- /23/ Fahn, A.:
Plant Anatomy
Oxford 1982
- /24/ Fengel, D.:
Molekularer und Übermolekularer Aufbau von Holz
Umschau 1970, Heft 14, S. 434 - 441

- /25/ Fengel, D.:
Chemische und elektronen-mikroskopische Untersuchung
eines fossilen Fichtenholzes
Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 8 (1971), S. 305 - 313
- /26/ Fengel, D., Grosser, D.:
Chemische Zusammensetzung von Nadel- und Laubhölzern
Eine Literaturübersicht
Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 33 (1975), S. 32 - 34
- /27/ Fengel, D., Grosser, D.:
Holz, Morphologie und Eigenschaften
Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, Band 12,
Verlag Chemie Weinheim/New York (1976)
- /28/ Fengel, D.:
Untersuchungen von fossilen Holzproben mit Hilfe
elektronen-mikroskopischer und chemischer Methoden
Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 34 (1976), S. 459 - 463
- /29/ Fraunhofer Institut für Holzforschung:
Untersuchungsbericht zur Prüfung der Schwindung von
Gründungspfählen aus dem Fundament der Magnikirche in
Braunschweig in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsverlust
(1973) - unveröffentlicht
- /30/ Fraunhofer Institut für Holzforschung:
Abschlußbericht
Untersuchungen zum Tragverhalten von Holzpfahlgründungen
in Abhängigkeit der Holzzerstörung im Untergrund,
Teilprojekt: Holzkundliche Untersuchungen
(1985) - unveröffentlicht
- /31/ Frey-Wyssling, A.:
The Plant Cell Wall
in Handbuch der Pflanzenanatomie, Band 3, Teil 4
Berlin, Stuttgart (1976)

- /32/ Frey-Wyssling et al.:
Elementarfibrillen als Grundbausteine der nativen
Zellulose
Holz als Roh- und Werkstoff, Nr. 10 (1966), S. 443 ff
- /33/ Galle, E. M. et al.:
Stresses around a wellbore due to internal pressure
and unequal principal geostatic stresses
36th annual fall meeting of spe
(1961), Dallas
- /34/ Gibson, E., Anderson, W. F.:
In situ measurement of soil properties with the
pressuremeter
Civil engineering and public works review,
Vol. 56, No 658, D. 6/5 - 6/8, (1961)
- /35/ Gruber, E., Krause, Th., Schurz, J.:
Cellulose
Ullmanns Encyclopädie der Technischen Chemie, Band 9,
S. 184 - 191, Verlag Chemie Weinheim/New York (1976)
- /36/ Grundbautaschenbuch
Band I, 2. Auflage
Ernst & Sohn (1966)
- /37/ Grundbautaschenbuch
Teil 1 und 2, 3. Auflage
Ernst & Sohn (1980)
- /38/ Günther, E.:
Die Nachgründung durch Fundamentverbreiterung am
Beispiel historischer Bauwerke
Bau und Bauindustrie, 24/1966, S. 1075 - 1079
- /39/ Günther, E.:
Nachgründung mit Pfählen am Beispiel historischer
Bauwerke
Bau und Bauindustrie, 6/1967, S. 402 - 407

- /40/ Günther, E.:
Bausicherungsmaßnahmen an der St. Johanniskirche zu
Verden/Aller (1968/69)
Niedersächsische Denkmalpflege (Sonderdruck), Band 6,
Hildesheim (1970)
- /41/ Günther, E.:
Sicherungsarbeiten am Schloß zu Celle
Niedersächsische Denkmalpflege 8 (1972-75), S. 159 f
- /42/ Haller, J.:
Untersuchungen zum Vorspannen von Mauerwerk historischer
Bauten - Dissertation
Universität Karlsruhe (1981)
- /43/ Harmsen, L., Vincents Nissen:
Der Bakterienangriff auf Holz
Holz als Roh- und Werkstoff 23 (1965), Nr. 10, S. 389-393
- /44/ Hettler, A.:
Verschiebung starrer und elastischer Gründungskörper in
Sand bei monotoner und zyklischer Belastung
Dissertation
Universität Karlsruhe (1981)
- /45/ Hilmer, K.:
Saving Old Buildings
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Vol. III 9/23
- /46/ Holz, D.:
Untersuchungen zum Alterungsverhalten des Werkstoffes
Holz
Holzindustrie, Leipzig 34 (1981), Nr. 2, S. 40 - 41

- /47/ Hubbert, M., Willis, D.:
Mechanics of hydraulik fracturing
Petroleum Branch Fall Meeting,
Los Angeles (1956)
- /48/ Hughes, J. M. O., Wroth, C. P., Windle, D.:
Pressuremeter tests in sand
Geotechnique 27 (1977), Nr. 4, S. 455 - 477
- /49/ Jaeger, J. C., Cook, N. G. W.:
Fundamentals of rock mechanics
Chapman and Hall
111 New Fetter Lane, London (1969)
- /50/ Jewell, J. R., Fahey, M., Wroth, C. P.:
Laboratory studies of the pressuremeter test in sand
Geotechnique 30 (1980), Nr. 4, S. 507 - 531
- /51/ Jordan, P.:
Bodenverflüssigung
Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Wasserwesen
und Verkehrswesen der Ruhr-Universität Bochum
(Hrsg. Prof. Jessberger) Serie Grundbau, Heft 1
Bochum (1979)
- /52/ Juransky, K. A.:
Wandlungen des Holzes auf dem Weg zur Kohle
Geologische Rundschau
Stuttgart (1938), Nr. 29, S. 441 - 461
- /53/ Kästner, H.:
Statik des Tunnel- und Stollenbaues
Springer-Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg (1962)
- /54/ Kennedy, R. W.:
Strength Retention in Wood Decayed to Small Weight Losses
Forest. Prod. J. (1958), Nr. 10, S. 308 - 314

- /55/ Klopfer, H.:
Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen
Bauverlag (1974)
- /56/ Kédzi, A.:
Handbuch der Bodenmechanik
Band I - III, VEB Verlag für Bauwesen, Berlin (1969)
- /57/ Knöfel, D.:
Stichwort Holzschutz, 2. Auflage
Bauverlag, Wiesbaden, Berlin (1982)
- /58/ Kollmann, F.:
Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, Band I,
Springer-Verlag, Berlin - Göttingen - Heidelberg (1951)
- /59/ Kollmann, F.:
Sprünge und das Maß der Mitte im org. Naturgeschehen
Naturw. Rundschau, Heft 6 (1966), S. 233 - 231
- /60/ Kollmann, F. et al.:
Gefüge- und Eigenschaftsänderungen im Holz durch
mechanische und thermische Beanspruchung
- /61/ Kommert, R., Wienhaus, O.:
Untersuchungen chemischer und physikalischer Eigen-
schaften von Holz aus Kulthöhlen der Bronzezeit
Holztechn. II (1970), S. 177 - 182
- /62/ Kommert, R.:
Eigenschaften von Eichenholzfunden aus der Frühgeschichte
Teil I: Allgemeine und spezielle Bemerkungen zur Untersu-
chung von Holzfunden
Holztechn. 21 (1980), S. 171 - 174

- /63/ Kommert, R.:
Eigenschaften von Eichenholzfundern aus der Frühgeschichte
Teil II: Sorptionsverhalten
Holztechn. 21 (1980), S. 230 - 233
- /64/ Kommert, R.:
Eigenschaften von Eichenholz aus der Frühgeschichte
Teil IV: Rohdichte, Druckfestigkeit, Biege- und
Schlagfestigkeit
Holztechn. 22 (1981), S. 166 - 170
- /65/ Kretzmer, F.:
Bilddokumente römischer Technik
Düsseldorf (1967)
- /66/ Luers, H.:
Holzverzuckerung
Ullmanns Encyklopädie der techn. Chemie
3. Auflage, Band 8, S. 591 - 599
- /67/ Lundström, R. B.:
The Quality of the Wood in Timber Piles
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Vol. III 9/19
- /68/ Macaulay, D.:
Eine Stadt wie Rom
Artenis-Verlag Zürich, München (1983)
- /69/ N. N.:
Copenhagen gets that sinking feeling
Intern. Construction (IC), 16 (1977), Nr. 10, S. 56 - 61
- /70/ Palladio, A.:
Die vier Bücher zur Architektur
"I quattro libri dell'architettura"
benutzt: 1. deutschsprachige Übersetzung aus der Ausgabe
Venedig (1570)
Beyer, A. / Schütte, U., Zürich, München (1983)

- /71/ Peek, R.-D., Willeitner, H.:
Behaviour of wooden pilings in long time service
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Vol. III 9/23
- /72/ Pflister, R., Rūth, G.:
Wiederherstellungsarbeiten am Dom zu Speyer (1930/31)
Pflister, R.: Die Wiederherstellung vom Standpunkte der
Denkmalspflege
Rūth, G.: Die technischen Sicherungsmaßnahmen
Die Denkmalpflege (Sonderdruck), Heft 4/5, Berlin, Wien
(1933)
- /73/ Pieper, K.:
Gutachten zur Beurteilung der vorhandenen Sicherheit und
zu Verstärkungsmöglichkeiten der Stiftskirche St. Martin
in Landshut
Gutachten vom 15. Februar 1977, unveröffentlicht
- /74/ Pieper, K.:
Die Unterfangung der Türme der St. Katharinenkirche in
Braunschweig
Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen
Gesellschaft, Band 32 (1981)
- /75/ Pieper, K., Wenzel, F.:
Statik und konstruktive Sicherung in der Denkmalpflege
Reihe: Aus Forschung und Lehre
Institut für Tragkonstruktionen der TH Karlsruhe,
Heft 14, Karlsruhe (1981)
- /76/ Pieper, K.:
Sicherung historischer Bauten
Braunschweig
Verlag Ernst & Sohn, Berlin, München (1983)

- /77/ Placzek, D.:
Untersuchungen über das Schwindverhalten bindiger Böden
bei der Trocknung unter natürlichen Randbedingungen
Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau u. Bodenmechanik
Herausg. Prof. Dr.-Ing. H. Nendza, Heft 3 (1982)
- /78/ Pupp, E.:
Bautechnik im Altertum
München (1964)
- /79/ Raabe, E.-W., Schnell, W. Sondermann, W.:
Variable Steuerung und Datenerfassung in der bodenmecha-
nischen Versuchstechnik
Tunnelbau, Ingenieurbau, Straßenbau (1982), S. 519 - 528
- /80/ Rypacek:
Biologie holzerstörender Pilze
VEB Gustav-Fischer-Verlag, Jena (1966)
- /81/ Roney, H.:
Protection of piles: wood, concrete, steel
Civil Engineering-ASCE, 12/75, S. 59 - 64
- /82/ Rostásy, F. S.:
Baustoffe
Verlag Kohlhammer, Stuttgart, Berlin, Köln, Mainz (1983)
- /83/ Rūth, G.:
Bautechnische und statische Ursachen der Schäden am
Mainzer Dom und die Sicherungsarbeiten zur Erhaltung des
Bauwerkes
Der Bauingenieur 7 (1926), Heft 25
- /84/ Rūth, G.:
Sicherungsarbeiten an gefährdeten alten Bauwerken
Zentralblatt der Bauverwaltung (1929), Nr. 10

- /85/ Rüth, G.:
Bauliche Sicherung und Wiederherstellung alter Turmbauten
Zentralblatt der Bauverwaltung 56 (1936), S. 37 - 43
- /86/ Sandermann, W., Dietrichs, H. H., Gottwald, H.:
Untersuchung frühgeschichtlicher Hölzer und deren
Bedeutung für den Holzschutz
Holz als Roh- und Werkstoff Nr. 16 (1958), S. 197 - 204
- /87/ Sandermann, W.:
Chemische Holzverwertung
Fermentierungsverfahren
BLV-Verlag München, Basel, Wien (1963)
- /88/ Scheffer-Schachtschabel:
Lehrbuch der Bodenkunde
9. Auflage (1976), Ferd. Enke-Verlag, Stuttgart
- /89/ Schmitt, E.:
Handbuch der Architektur
1. Band: Konstruktionselemente in Stein, Holz und Eisen
Fundamente
3. Teil: Hochbaukonstruktionen
3. Aufl., Verlag Bergsträsser, Stuttgart (1901)
- /90/ Schultze, E.:
Erhaltung und Sanierung von Baudenkmälern
- Baugrund und Gründungen -
Mitteilungen aus dem Institut für Verkehrswasserbau,
Grundbau und Bodenmechanik (VGB), TH Aachen, Heft 53,
Aachen (1971)
- /91/ Schultze-Dewitz, G.:
Versuche an Mooreichenholz
Holztechnologie 3 (1962), S. 266 - 268

- /92/ Schulze, H., Duddek, H.:
Spannung in schildvorgetriebenen Tunneln
Beton und Stahlbeton, 8 (1964)
- /93/ Schwaab, E., Waschau, A., Willeitner, H.:
Bohrkerne zur Beurteilung der Festigkeit hölzerner
Ramppfähle
Bauen und Holz 84 (1982), S. 566 - 570
- /94/ Simons, H., Wichert, H.-W.:
Gutachtliche Stellungnahme "Überwasserkirche Münster"
- unveröffentlicht -
- /95/ Smolczyk, U.:
Saving Cities and old Buildings, State-of-the-Art-Report
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Vol. III 9
- /96/ Sohn, A. W.:
Lignin
Ullmanns Encyklopädie der Techn. Chemie, Band 16
S. 253 - 260, Verlag Chemie, Weinheim/New York (1976)
- /97/ Straub, H.:
Die Geschichte der Bauingenieurkunst
Basel, Stuttgart (1964)
- /98/ Sundquist, H., Broms, B. B.:
Complicated Foundations in the Central Park of Stockholm
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Vol. III 9/25
- /99/ Szabo, I.:
Höhere Technische Mechanik
5. Auflage, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg-New York
(1972)

- /100/ Terzaghi / Jelinek:
Theoretische Bodenmechanik
Spannungsverteilung in der Umgebung von Bohrlöchern und
Schächten
Springer-Verlag (1954)
- /101/ Toole, E. R.:
Effect of Decay on Crushing Strength
Forest Prod. J. 19 (1969), Nr. 10, S. 36 - 37
- /102/ Toole, E. R.:
Reduction in crushing strength an weight associated
with decay by rot fungi.
Wood Science 3 (1971), Nr. 3, S. 172 - 178
- /103/ Vitruvius, P. M.:
Zehn Bücher über Architektor
Übersetzung C. Fensterbusch
Wissenschaftl. Buchgesellschaft Darmstadt (1981)
- /104/ Vogeley, J.:
Untersuchungstechniken und Untersuchungsmethoden bei
der Sicherung historischer Bauten
Seminar, Split 1978
Reihe: Aus Forschung und Lehre
Institut für Tragkonstruktionen der TH Karlsruhe,
Heft 10, Deutsche Fassung, Karlsruhe (1980)
- /105/ Vorreiter, L.:
Mikrobiologie des Holzes - Ein Leitfaden
Verlag H. Cram, Berlin (1961)
- /106/ Waschkowski, E., Pilot, G., Bustamente, M.:
Foundations Repair of a Scoured Middle-Age Bridge
Proc. X Ing. Conf. Int. Soc. Soil Mech. Found. Ing.
(1981), Stockholm, Vol. III 9/27

- /107/ Wenzel, F.:
Sicherung historischer Bauten
Dokumentation der Fachtagung im Juni 1977
Reihe: Aus Forschung und Lehre
Institut für Tragkonstruktionen der TH Karlsruhe, Heft 5
Karlsruhe (1978)
- /108/ Wenzel, F.:
Beispiele und Erfahrungen
Sicherung historischer Bauten
Dokumentation der Fachtagung April 81
Reihe: Aus Forschung und Lehre
Institut für Tragkonstruktionen der TH Karlsruhe, Heft 13
Karlsruhe (1981)
- /109/ Wenzel, F.:
Beispiele für gründungstechnische Probleme beim
Denkmalschutz
Geotechnik 4 (1981), Nr. 2, S. 49 - 58
- /110/ Wenzel, F.:
Zur Arbeit des Bauingenieurs in der Denkmalpflege
Bauwelt, Heft 31/32 (1982)
- /111/ Wenzel, F.:
Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke, Forschungs-
programm 1985
Verlag Ernst & Sohn, Berlin (1987)
- /112/ Westergaard, H. H.:
Plastic state of stress around a deep well
Journal of the Boston Society of Civil Engineers
Volumne XXVII, Jan. 1940, No. 1, S. 1 - 5
- /113/ Willeitner, H.:
Gutachten über den Zustand des Holzes für Gründungspfähle
· der Überwasserkirche in Münster - unveröffentlicht

- /N 1/ DIN 1052:
Holzbauwerke T. 1
Ausgabe 10/69
- /N 2/ DIN 1054:
Zulässige Belastung des Baugrundes
Ausgabe 11/76
- /N 3/ DIN 1055:
Lastannahmen für Bauten, Bodenkenngrößen, Teil 6
Ausgabe 3/80
- /N 4/ DIN 4017:
Grundbruchberechnungen
Ausgabe 8/79
- /N 5/ DIN 4021:
Baugrund, Erkundung durch Schürfe und Bohrungen sowie
Entnahme von Proben
Teil 1: Ausgabe 7/71
Teil 2: Ausgabe 2/76
Teil 3: Ausgabe 8/76
- /N 6/ DIN 4022:
Benennen und Beschreiben von Boden und Fels, Teil 1
Ausgabe 11/69
- /N 7/ DIN 4026:
Rammpfähle
Ausgabe 8/75
- /N 8/ DIN 4107:
Baugrund, Setzungsbeobachtungen
Ausgabe 1/78

- /N 9/ DIN 4123:
Gebäudesicherung im Bereich von Ausschachtungen,
Gründungen und Unterfangungen
Ausgabe 5/72
- /N 10/ DIN 18 121:
Wassergehalt, Teil 1
Ausgabe 4/76
- /N 11/ DIN 18 123:
Korngrößenverteilung
Ausgabe 4/83
- /N 12/ DIN 18 126:
Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei
lockerster und dichtester Lagerung
Ausgabe 3/81, Vornorm
- /N 13/ DIN 18 137:
Bestimmung der Scherfestigkeit im Kastenschergerät,
Teil 1
Ausgabe 3/72
im Triaxialversuch, Teil 2
Ausgabe 4/83
- /N 14/ DIN 52 175:
Holzschutz, Begriffe, Grundlagen
Ausgabe 1/75
- /N 15/ DIN 52 180:
Prüfung von Holz, Probenahme
Ausgabe 11/77
- /N 16/ DIN 52 181:
Bestimmung der Wuchseigenschaften von Nadel-schnittholz
Ausgabe 8/75

- /N 17/ DIN 52 182:
Bestimmung der Rohdichte
Ausgabe 9/76
- /N 18/ DIN 52 183:
Bestimmung des Feuchtegehaltes
Ausgabe 11/77
- /N 19/ DIN 52 184:
Bestimmung der Quellung und Schwindung
Ausgabe 11/79
- /N 20/ DIN 52 185:
Prüfung von Holz
Bestimmung der Druckfestigkeit parallel zur Faser
Ausgabe 9/76
- /N 21/ DIN 52 186:
Biegeversuch
Ausgabe 6/78
- /N 22/ DIN 52 192:
Druckversuche quer zur Faserrichtung
Ausgabe 5/79
- /N 23/ DIN 68 364:
Kennwerte von Holzarten, Festigkeit, Elastizität,
Resistenz
Ausgabe 11/79
- /N 24/ DIN 68 800:
T. 1: Holzschutz im Hochbau, Allgemeines
Ausgabe 5/75
T. 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen
Ausgabe 5/74
T. 3: Vorbeugender chemischer Schutz von Vollholz
Ausgabe 5/81
T. 4: Bekämpfungsmaßnahmen gegen Pilz- u. Insektenbefall
Ausgabe 5/74

/N 25/ DIN 68 810:

Imprägnierte Holzpfähle

Ausgabe 4/78